NÚMERO ESPECIAL

INVESTIGACIÓN Y CIENCIA

Noviembre 2020 • N.º 530 • 6,90 € • investigacionyciencia.es

Edición española de SCIENTIFIC AMERICAN

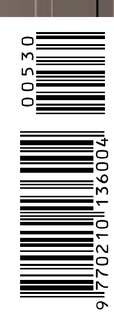
GRANDES HITOS Y PRÓXIMOS RETOS DE LA CIENCIA

Un recorrido por las ideas que más han transformado nuestra visión del mundo

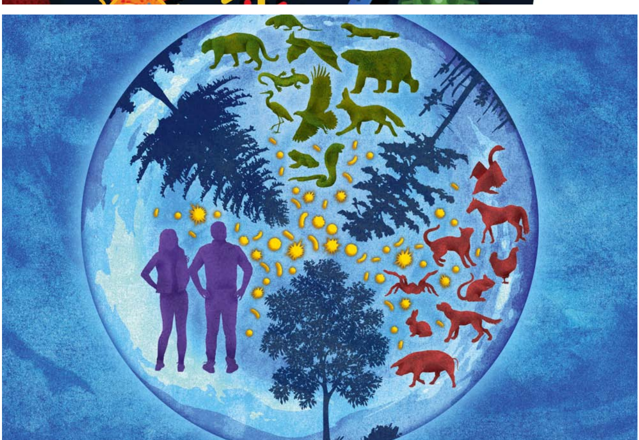
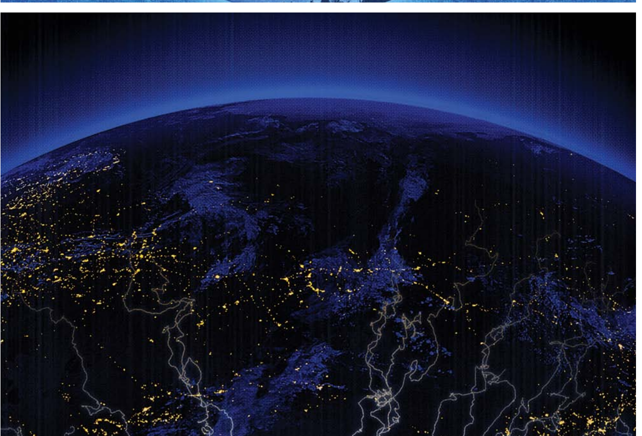
INVESTIGACIÓN Y CIENCIA

GRANDES HITOS Y PRÓXIMOS RETOS DE LA CIENCIA

NOVIEMBRE 2020 N.º 530






INVESTIGACIÓN Y
CIENCIA

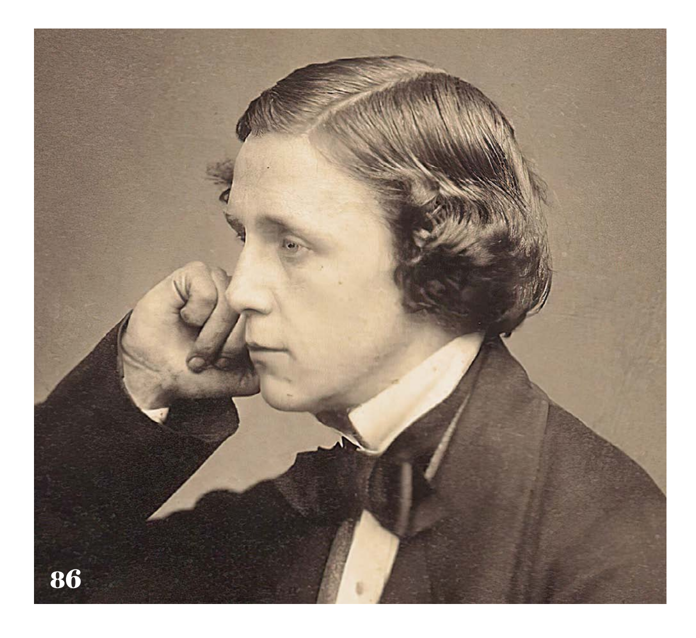
Noviembre 2020, Número 530

• NÚMERO ESPECIAL •

**GRANDES HITOS
Y PRÓXIMOS RETOS DE LA CIENCIA**



44



INVESTIGACIÓN Y
CIENCIA

SECCIONES

redaccion@investigacionyciencia.es



Mayo 2020



Julio 2020

CONFUSIÓN CÓSMICA

En «La crisis en torno a la constante de Hubble», de Richard Panek [Investigación y Ciencia, mayo de 2020], echo en falta una explicación de por qué la constante de Hubble (H_0) debería ser constante, especialmente cuando en el texto se describe el hallazgo, en los años noventa del siglo pasado, de que el universo se expande de forma acelerada. ¿Cómo puede ser eso compatible con un valor constante de la tasa de expansión cósmica?

La intuición del aficionado, como yo, es pensar que ese parámetro no puede ser constante y que, de hecho, fue mayor en el pasado que en la actualidad. Eso sería perfectamente compatible con la observación de que los valores de H_0 obtenidos a partir del fondo cósmico de microondas (es decir, relativos al universo primitivo) sean menores que los deducidos a partir de las mediciones del universo reciente.

Javier Merinero
Madrid

Responde Panek: *El término «constante de Hubble» es comprensiblemente confuso. Su valor no es constante en el tiempo —como bien refleja el descubrimiento de 1998 de la aceleración en la tasa de expansión del universo—, sino que proporciona la tasa de expansión en un instante dado. Como consecuencia, cambia a lo largo de la evolución del universo.*

Aunque las mediciones del fondo cósmico de microondas hacen referencia al universo primitivo, lo que los cosmólogos realmente hacen es usar esos datos para predecir qué valor debería tomar la constante de Hubble en la actualidad. Otros cosmólogos la miden directamente a partir de observaciones del universo tardío. Ambos resultados deberían coincidir, pero no lo hacen.

ALZHÉIMER Y VACAS LOCAS

Me ha sorprendido que el extenso artículo «Las bases neurobiológicas del alzhéimer», de Kenneth S. Kosik [Investigación y Ciencia, julio de 2020], no haga ninguna mención a la encefalopatía espongiforme bovina, o mal de las vacas locas, ya que esta enfermedad se halla salpicada de rasgos definitorios que recuerdan a los del alzhéimer. ¿Hay alguna razón para que no se considere ninguna conexión entre los mecanismos de ambas enfermedades? ¿Existe algún estudio que descarte explícitamente esa conexión?

José María Ramos Barceló
Madrid

Responde Kosik: *La encefalopatía espongiforme bovina pertenece a la categoría de enfermedades denominadas priónicas, las cuales tienen una variedad de manifestaciones clínicas que suelen distinguirse de las de la enfermedad de Alzheimer.*

Las enfermedades priónicas pueden transmitirse por la ingestión de la proteína priónica, como ocurre en el caso de la encefalopatía espongiforme bovina al consumir carne infectada. Lo más llamativo de los priones es su capacidad para propagarse en total ausencia de ADN o ARN, que es el mecanismo usado por todos los demás agentes infecciosos para replicarse. Los priones, en cambio, se propagan mediante el paso de la proteína anormal a otras células. Una vez allí, alteran la proteína priónica habitual para que esta copie el plegamiento de la proteína invasora, lo que a la postre acaba por destruir la célula infectada.

En el caso de la enfermedad de Alzheimer, existen pruebas de que la proteína tau puede propagarse de célula a célula de manera similar a como lo hacen los priones. Sin embargo, no hay indicios de que la proteína tau anómala pueda propagarse de persona a persona, como tampoco los hay de que la enfermedad de Alzheimer sea contagiosa en modo alguno. Por ello, aunque decimos que la proteína tau es «de tipo priónico», difiere enormemente de los priones en lo que respecta a la propagación entre individuos.

Errata corrige

En el artículo **El ascenso de los robles y las encinas** [por Andrew L. Hipp, Paul S. Manos y Jeannine Cavender-Bares; Investigación y Ciencia, octubre de 2020], en la página derecha de la infografía debe sustituirse *noroeste* por *noreste* en la frase «En el lado este, los robles blancos y rojos se dividieron a su vez en los linajes del noroeste, del sureste y tejano».

Tal y como nos avisa nuestro lector Juan Manuel Martín Barrientos, en el artículo **¿Cuánto vale la suma de todos los números naturales?** [por Bartolo Luque; Investigación y Ciencia, octubre de 2020] aparece un error en el desarrollo de Taylor de la función $1/(1+x)^2$ (pág. 88); el primer término de dicho desarrollo no es x, sino 1. Juan S. Medina Álvarez observa, además, que el punto en el que la continuación analítica de $S(z)$ vale 1/2 no es $z = 1$, sino $z = -1$.

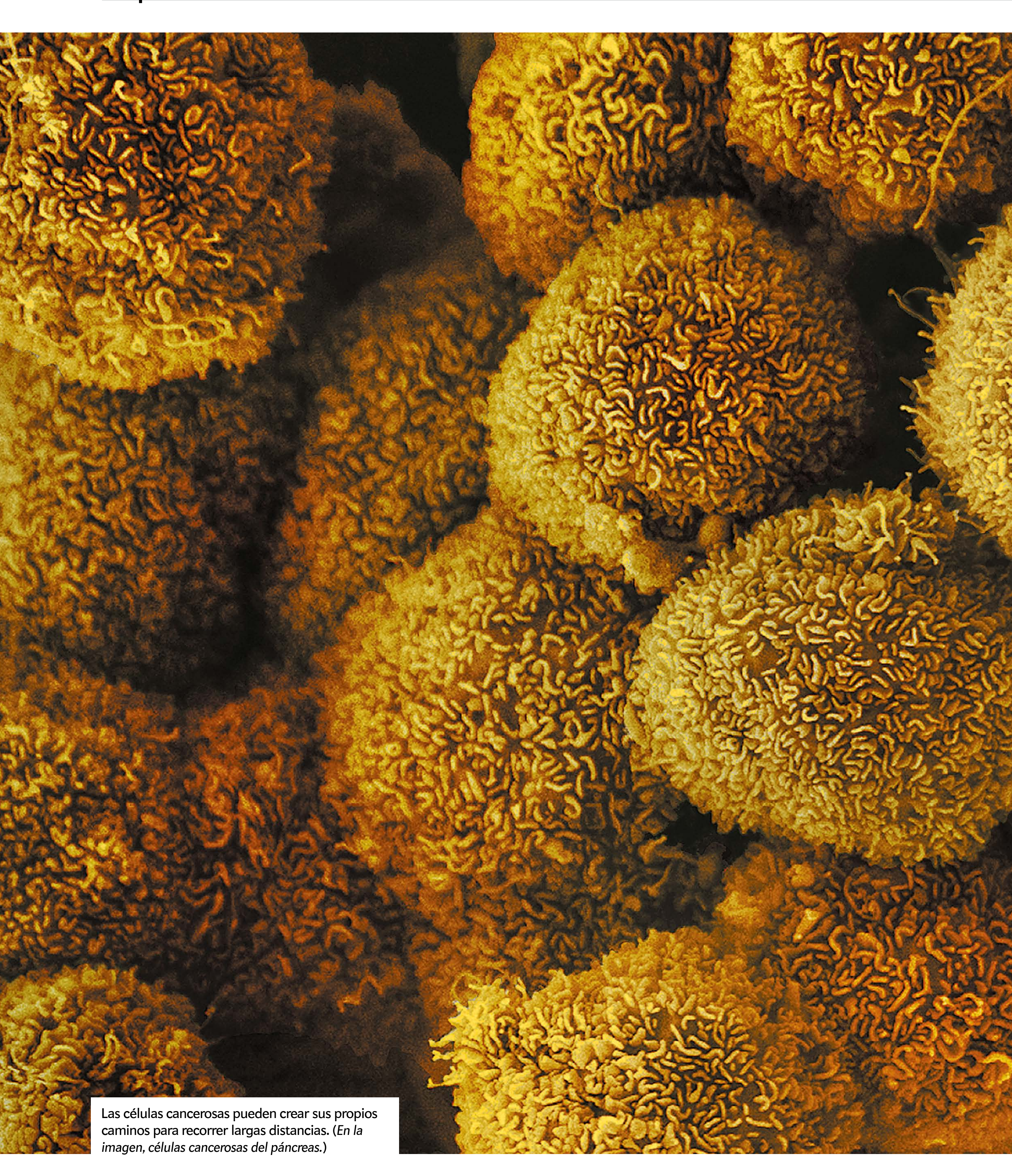
Estos errores han sido corregidos en la edición digital de los artículos correspondientes.

CARTAS DE LOS LECTORES

Investigación y Ciencia agradece la opinión de los lectores. Le animamos a enviar sus comentarios a:
PRENSA CIENTÍFICA, S. A.
Muntaner 339, pral. 1.ª, 08021 BARCELONA
o a la dirección de correo electrónico:
redaccion@investigacionyciencia.es

La longitud de las cartas no deberá exceder los 2000 caracteres, espacios incluidos. Investigación y Ciencia se reserva el derecho a resumirlas por cuestiones de espacio o claridad. No se garantiza la respuesta a todas las cartas publicadas.

Apuntes



Las células cancerosas pueden crear sus propios caminos para recorrer largas distancias. (*En la imagen, células cancerosas del páncreas.*)

BIOLOGÍA

¿Cómo se desplazan las células?

Una estrategia similar a la del comecocos orienta a las amebas y a las células tumorales en los recorridos complejos

Las células pueden emprender viajes increíbles que en ocasiones las llevan a atravesar el cuerpo entero. Se desplazan por quimiotaxia, siguiendo las concentraciones cambiantes de ciertas sustancias que señalan el camino hasta el destino. Ahora bien, ese tipo de gradiente no abarca grandes distancias porque el rastro se disipa, así que los especialistas se han preguntado qué las guía a través de las variadas señales químicas de un viaje largo. Entender el proceso podría ayudar algún día a predecir mejor la diseminación del cáncer por el organismo o saber de qué modo las células hallan su lugar idóneo en el embrión en desarrollo.

En un estudio publicado en *Science* se explica ahora el uso de laberintos en miniatura para ilustrar cómo llevan a cabo esos desplazamientos inverosímiles dos formas de vida microscópica: una ameba saprófita y células de una estirpe tumoral de ratón. En lugar de viajar a lo largo de un gradiente preexistente durante todo el recorrido, crean el suyo propio. Descomponen las sustancias con las que se guían a medida que las encuentran, de modo que estas se acumulan en mayor cantidad delante de ellas que por detrás. Igual que Teseo recogió el hilo mientras caminaba por el laberinto o el comecocos va devorando las filas de bolas, el tramo que queda sin sustancia al paso de la célula la mantiene orientada hacia adelante.

Ya se sabía que ciertas células generan sus propios gradientes conforme se mueven, pero no que esta estrategia fuera lo bastante eficaz como para posibilitar largos recorridos a través del cuerpo. El nuevo estudio muestra que tanto la estirpe de células tumorales de mamífero como la ameba se desplazan de ese modo a través de laberintos, lo que induce a pensar que podría ser una táctica esencial para recorrer grandes distancias.

ANNE WESTON, SCIENCE SOURCE

Luke Tweedy, del Instituto Beatson de Investigaciones Oncológicas de Glasgow, y sus colaboradores razonaron que seguir un camino sinuoso a través de la intrincada topografía de un ser vivo podría ser algo muy parecido a recorrer un verdadero laberinto. Para examinar esa capacidad de rastreo, eligieron células de cáncer de páncreas de ratón y la ameba *Dictyostelium discoideum*. Esta última, a la que Tweedy califica de «prodigio de la quimiotaxia», es conocida por su habilidad en recorrer grandes distancias por medio de gradientes químicos.

En efecto, no defraudó en absoluto: solo necesitó una hora para recorrer un laberinto complejo y sembrado de quimioatrayentes que las células tumorales tardaron días en atravesar. Eso sí, ambas lo acabaron consiguiendo. Las células fueron sometidas a prueba en varios laberintos, algunos con callejones sin salida más cortos o más largos y con distintas bifurcaciones. Cuando tuvieron que elegir entre un callejón sin salida y el recorrido correcto, algunas células erráticas despacharon toda la sustancia quimiotáctica atrapada en la vía muerta. El resto se orientó hacia la otra rama de la bifurcación, donde seguían fluyendo las moléculas atrayentes.

El empleo de esta táctica por estos dos tipos de células parece denotar la existencia de una habilidad común en las células que se orientan a gran distancia. La conclusión «es realmente interesante y muestra que los gradientes autogenerados constituyen un mecanismo universal de la migración direccional de grupos de células a larga distancia», afirma Pablo Sáez, bioquímico del Hospital Universitario de Hamburgo-Eppendorf, a título de observador externo. Añade que los resultados ponen de manifiesto la utilidad de algunas de las técnicas implicadas, como la predicción mediante modelos matemáticos del posible comportamiento de las células y la comprobación de las predicciones en laberintos.

En un ensayo memorable, se tomó como modelo el famoso laberinto de los jardines del Palacio de Hampton Court, en las afueras de Londres. Según Teedy, lo escogieron por su carácter extravagante y sorprendente, que cautivaba la imaginación. La ameba prodigiosa no se limitó a recorrerlo de cabo a rabo, sino que demostró su dominio en la generación del gradiente encontrando un atajo.

«Creo que el diseño de los laberintos está muy logrado», opina Denise Montell, bióloga molecular y celular de la Universidad de California en Santa Barbara. «Es una forma realmente ingeniosa de poner a prueba el modo en que las células toman las decisiones, aunque no creo que en condiciones reales se encuentren con laberintos de verdad.» Montell plantea que las células también podrían servirse de otros mecanismos para recorrer distancias largas, como seguir las señales químicas liberadas por una fuente móvil.

Los métodos de investigación y el diseño experimental empleados por el equipo podrían adaptarse para investigar el comportamiento de otras células migrantes en el cuerpo humano, como la actividad de las células inmunitarias o los desplazamientos patológicos de las células tumorales metastásicas, aclara Tweedy: «Comparten el mismo mecanismo básico de migración, en el que los receptores detectan los atrayentes y orientan el citoesqueleto para que la célula se desplace.»

De hecho, las semejanzas son lo bastante grandes para que Tweedy vislumbre muchos modos de aprovechar esa capacidad de la ameba para desentrañar el comportamiento de las células humanas. De este modo, los planteamientos basados en laberintos podrían ayudar a predecir los caminos que el glioblastoma, un tipo de cáncer, toma a través del encéfalo.

Montell afirma que los hallazgos también ayudar a entender el comportamiento de las células especialmente peripatéticas de los embriones. Algunas, como los melanocitos, se dispersan por todo el embrión y dotan a la piel de su pigmentación al pro-

COMPORTAMIENTO ANIMAL

Señales de murciélago

Los animales que emiten sonidos de ecolocalización deben comer más en los ambientes ruidosos



Murciélago enano de bosque (*Pipistrellus nathusii*).

ALAMY

Cada noche los murciélagos abandonan sus escondrijos en busca de alimento. Puesto que ello les supone un esfuerzo, los insectos que devoran han de proporcionarles las calorías necesarias para compensar el coste energético de la caza. Como emplean la misma musculatura torácica y abdominal para volar que para emitir los sonidos, numerosos investigadores pensaban que la vocalización en vuelo no entrañaba una inversión de energía mucho mayor que el acto de batir las alas por sí solo. Pero ahora un nuevo estudio pone en duda esa suposición. Los resultados se han publicado en *Nature Ecology & Evolution*.

«Cuando emiten los sonidos en un entorno tranquilo, esa suposición se sostiene», afirma Shannon Currie, del Instituto Leibniz de Investigaciones Zoológicas y Faunísticas, en Alemania. Pero «emitir sonidos potentes es sumamente costoso». El equipo de Currie midió el metabolismo y la intensidad de los sonidos de ecolocalización de nueve murciélagos enanos de bosque (*Pipistrellus nathusii*) que capturaron en zonas urbanas de Berlín y que liberaron tras someterlos a pruebas de laboratorio. Cuando se los expuso a sonidos ambientales normales mientras volaban en un túnel de viento, emitieron las señales con una intensidad de 113 decibelios. Pero cuando a estos se añadieron ultrasonidos, «alzaron la voz» hasta los 128 decibelios, lo cual exige casi 30 veces más energía, aclara Currie. Aunque sus vocalizaciones son inaudibles para el oído humano, ese aumento del volumen equivale a la diferencia entre escuchar cerca una motosierra

ducir la melanina. En momentos posteriores de la vida, se convierten a veces en el origen de un melanoma, y pueden mostrar unas dotes de orientación equiparables cuando producen metástasis. Que esas células puedan alcanzar ambos objetivos mediante gradientes generados por ellas mismas «es una idea muy interesante, nada evidente y probablemente importante», opina Montell.

Los resultados del estudio podrían también ofrecer una visón singular de otros procesos tempranos del embrión mamífero. Un ejemplo lo protagonizan el grupo de células que, en las fases iniciales del desarrollo embrionario, acaban en las gónadas desde un punto de partida lejano. Llamadas germinales, estas células tienen que hallar el camino a través de la accidentada geografía del embrión para llegar al destino correcto.

Si se confirmase que el comportamiento de *Dictyostelium* y de las mucho más lentas células tumorales pancreáticas es universal, no se podría descartar que las células germinales hiciesen uso de una táctica similar para encontrar las futuras gónadas y no acabar tomando un camino equivocado hacia, por ejemplo, el intestino. Tal vez sea inevitable que, durante la creación de un ser vivo complejo, algunas células tengan que abrir su propio camino para llegar adonde deben ir.

—Emily Willingham

---

o un motor a reacción, explica Craig Willis, biólogo de la Universidad de Winnipeg y especialista en quirópteros, ajeno al estudio.

Para compensar las calorías adicionales que consumen al elevar tanto el volumen, los murciélagos tendrían que devorar cada noche medio gramo más de insectos (alrededor del 7 por ciento de su peso). «Eso equivaldría a una verdadera comilona para nosotros», apunta Willis.

Obtener suficiente alimento para contrarrestar los ultrasonidos generados por la actividad humana, como los del tráfico rodado o la maquinaria pesada, puede ser difícil en entornos donde los insectos están en declive. «En muchos aspectos, la conservación de los insectos es sinónima de la conservación de los quirópteros, y ahora mismo estamos inmersos en una debacle, pues los insectos están desapareciendo a un ritmo alarmante», explica Willis. Según Currie, eso significa que los murciélagos de muchos lugares tienen más dificultades para buscar y menos que encontrar. Si queman más calorías de las que obtienen de sus presas, eso traerá problemas para estos mamíferos voladores. El ruido antrópico supone otro obstáculo más para su supervivencia.

—Jason G. Goldman

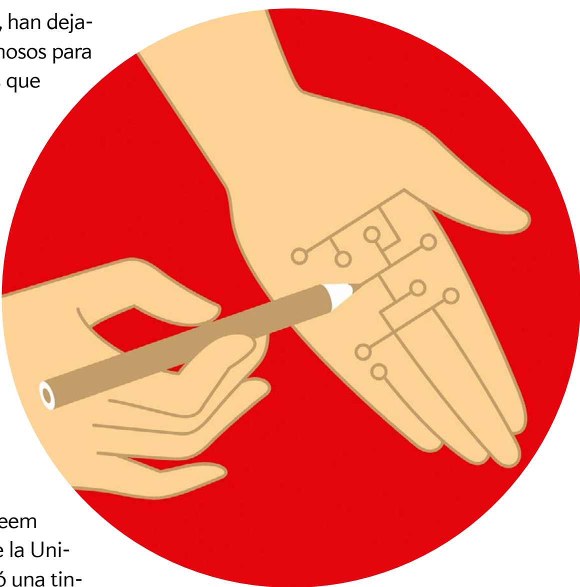
MEDICINA

Sensores pintados en la piel

Unas tintas especiales permiten crear dispositivos llevables de bajo coste para vigilar la salud

Un puñado de plantillas y tres bolígrafos: podría tratarse del material para una manualidad infantil, pero son las herramientas que ha empleado un grupo de investigadores para dibujar sobre la piel humana sensores capaces de monitorizar la salud.

Los dispositivos ponibles ayudan a los médicos a controlar diversos indicadores de la salud. En los últimos años, han dejado de ser instrumentos voluminosos para convertirse en parches flexibles que se adhieren a la persona como una suerte de tatuaje temporal. Pero esos sensores prefabricados pueden resultar caros y no se ajustan del todo a los contornos del usuario, así que se ven afectados por sus movimientos. Un nuevo sistema electrónico pintado sobre la piel podría ofrecer una solución a ambos problemas, según un estudio publicado en *Nature Communications*.



Un equipo liderado por Faheem Ershad, ingeniero biomédico de la Universidad de Houston, desarrolló una tinta conductora al añadir polvo de plata a una solución de polímero inocua para la piel humana. Los investigadores cargaron la tinta en bolígrafos modificados, pusieron una plantilla hecha de película y cinta adhesiva sobre un voluntario y trazaron los circuitos necesarios. «Es como cuando uno aprende a dibujar figuras de pequeño», asegura Ershad. «Es así de simple.» La tinta se secó en cinco minutos y dio lugar a un sensor operativo. Por último, los investigadores pegaron un cable eléctrico corriente con cinta adhesiva, para suministrar energía y transmitir los datos a un ordenador.

Con tan solo ese tipo de tinta, el equipo logró medir la hidratación cutánea y la actividad eléctrica del corazón y los músculos esqueléticos. Dado que el sensor se adapta perfectamente a la piel, los usuarios pueden moverse sin inducir vibraciones que reduzcan la calidad de los datos. La tinta resiste el sudor y los roces, pero se elimina sin problemas con una servilleta de papel húmeda y jabón. «Es un método robusto y fácil de aplicar en cualquier parte del cuerpo», afirma Dmitry Kireev, experto en bioelectrónica de la Universidad de Texas en Austin que no participó en el estudio. «Se trata de una solución muy elegante.»

Para obtener dispositivos más complejos, el grupo de Ershad usó otras dos tintas que actuaban como un semiconductor y un dieléctrico (un aislante), respectivamente. Dibujando capas distintas con cada tinta, crearon sensores de temperatura y tensión en una lámina de silicona similar a la piel. «Los autores ya han mostrado muchas aplicaciones atractivas», valora Zheng Yan, ingeniero biomédico de la Universidad de Misuri ajeno al estudio. Yan y sus colaboradores han desarrollado una técnica similar con lápices y papel, pero limitada a conductores pasivos que no aportan energía a un circuito. Al pintar componentes electrónicos activos como los transistores, que pueden servir de interruptores o amplificadores, Ershad espera diseñar sensores complejos que midan diversos aspectos relacionados con la salud, desde las sustancias presentes en el sudor hasta la actividad eléctrica del cerebro.

En un futuro, los investigadores pretenden incorporar circuitos de tinta más avanzados para generar sensores realmente inalámbricos. Según ellos, eso hará que cualquiera pueda controlar su salud desde casa mediante kits de plantillas y bolígrafos muy asequibles.

—Scott Hershberger

THOMAS FUCHS

GENÉTICA

Parásitos marinos afectados por los huracanes

Las grandes perturbaciones revuelven y homogenizan las poblaciones de pequeños crustáceos parásitos de peces

Poco después de que unos investigadores concluyesen la temporada de trabajo de campo en las aguas turquesas que separan las islas Vírgenes de Puerto Rico en 2017, una cadena de potentes huracanes devastó los lugares de estudio y los laboratorios. Esto supuso un grave contratiempo para el equipo y su labor sobre unos pequeños crustáceos parásitos poco conocidos llamados gnátidos, cuyas larvas se aferran a los peces marinos para nutrirse de sangre.

Pero la fatalidad también brindó una oportunidad singular para estudiar el impacto de los grandes huracanes en las poblaciones de animales marinos, señala el ecólogo molecular Juan Andrés Pagán, estudiante de posgrado en la Universidad de Oporto y autor principal de un estudio recientemente publicado en *Scientific Reports*. Desde 2013, el equipo, autodenonimado Gnathiid Gnation («Gnación Gnátida»), ha recolectado cada año una especie habitante de los arrecifes coralinos y nombrada en honor de Bob Marley (*Gnathia marleyi*). Tras el paso de los huracanes, volvieron a recoger más especímenes. Desafiaron a las medusas y a los tiburones para instalar trampas para los gnátidos, de hábitos eminentemente nocturnos.

En su nuevo estudio se secuenció el ADN de los ejemplares obtenidos en muestras recolectadas en varios lugares antes y después del paso de los huracanes, que constituyeron la más potente serie de temporales consecutivos que ha azotado la región en décadas. «Pudimos comprobar con bastante certeza que, antes de los huracanes, esas poblaciones eran estables», explica Pagán, lo cual significa que los parásitos permanecían en las mismas zonas aisladas, año tras año.

Después de las tormentas, las cosas cambiaron.

Los gnátidos no son grandes nadadores, no recorren largas distancias. En condiciones normales vagan por áreas pequeñas, a semejanza de otros invertebrados, como los crustáceos y los moluscos. Pero gracias a los huracanes de 2017, *G. marleyi* recorrió distancias inusualmente largas, superiores a 250 kilómetros en algunos casos. Los investigadores comprobaron que ese desplazamiento había provocado una mezcla de poblaciones, que dio como resultado una homogeneidad genética más acusada en ellos, explica el director del equipo Paul Sikkel, ecólogo marino de la Universidad Estatal de Arkansas y coautor del estudio. «Los huracanes lo homogeneizaron todo. La diversidad aumentó a escala local, pero el conjunto [de las poblaciones] devino más uniforme porque todo se había revuelto», aclara Sikkel. Esta podría ser la primera

prueba inequívoca de base genética de que los huracanes influyen en la diversidad genética de una especie marina, afirma.

«Para mí, el quid de la cuestión radica en el cambio climático», afirma Richard Aronson, biólogo marino del Instituto de Tecnología de Florida, que no ha participado en el estudio. Si, como anuncian las predicciones, la intensidad de los huracanes sigue aumentando, la uniformidad genética podría acentuarse en algunos animales marinos que de otro modo permanecerían en poblaciones aisladas, afirma Aronson. Esto reduce las posibilidades de que las poblaciones periféricas se segreguen y se conviertan en especies nuevas, añade.

Los autores también están investigando si estos parásitos hematófagos transmiten microbios nocivos a los peces. De ser así, opina Sikkel, el estudio ilustraría el riesgo que el paso de los futuros huracanes de gran magnitud supondría para la aparición de infecciones transmitidas por parásitos.

—*Stephenie Livingston*

MATTHEW NICHOLSON


Gnátido parásito

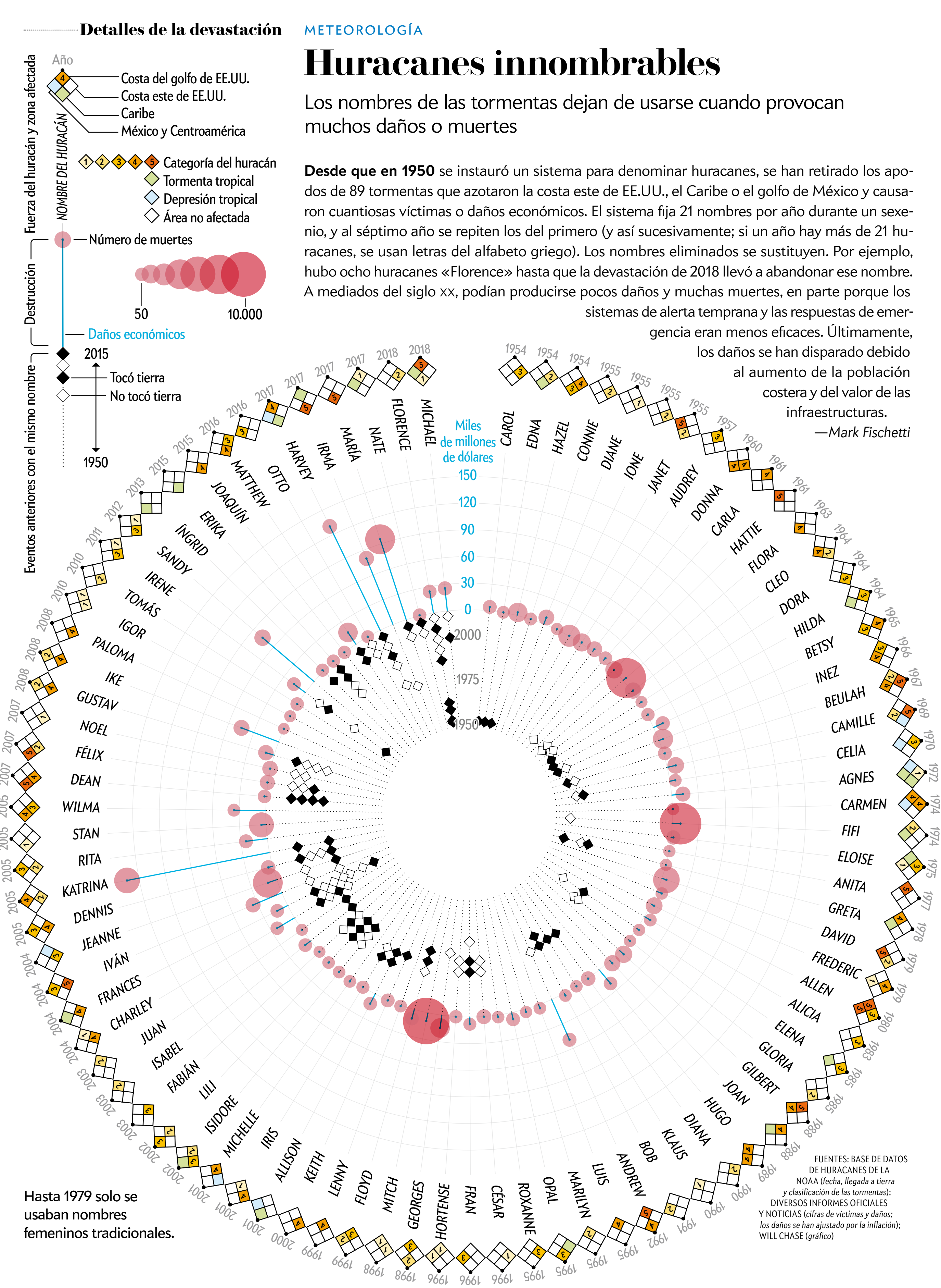
METEOROLOGÍA

Huracanes innombrables

Los nombres de las tormentas dejan de usarse cuando provocan muchos daños o muertes

Desde que en 1950 se instauró un sistema para denominar huracanes, se han retirado los apodos de 89 tormentas que azotaron la costa este de EE.UU., el Caribe o el golfo de México y causaron cuantiosas víctimas o daños económicos. El sistema fija 21 nombres por año durante un sexenio, y al séptimo año se repiten los del primero (y así sucesivamente; si un año hay más de 21 huracanes, se usan letras del alfabeto griego). Los nombres eliminados se sustituyen. Por ejemplo, hubo ocho huracanes «Florence» hasta que la devastación de 2018 llevó a abandonar ese nombre. A mediados del siglo XX, podían producirse pocos daños y muchas muertes, en parte porque los sistemas de alerta temprana y las respuestas de emergencia eran menos eficaces. Últimamente, los daños se han disparado debido al aumento de la población costera y del valor de las infraestructuras.

—*Mark Fischetti*



FUENTES: BASE DE DATOS DE HURACANES DE LA NOAA (*fecha, llegada a tierra y clasificación de las tormentas*); DIVERSOS INFORMES OFICIALES Y NOTICIAS (*cifras de víctimas y daños; los daños se han ajustado por la inflación*); WILL CHASE (*gráfico*)


Dos elefantes marinos en pugna.

COGNICIÓN ANIMAL

Gruñidos con personalidad

Los elefantes marinos macho perfeccionan sus voces de advertencia a medida que maduran

En la feroz palestra de una colonia de elefantes marinos septentrionales (*Mirounga angustirostris*), en la que muy pocos machos llegan a aparearse, los pretendientes suelen entablar combates sangrientos por el acceso a los grupos de hembras. Los galanes enfurecidos tienen un modo impactante de anunciar su presencia a los rivales: prorrumpen en gruñidos rítmicos y guturales, acompañados de sacudidas del cuerpo que literalmente hacen retumbar el suelo circundante.

Según un artículo recientemente publicado en *Animal Behaviour*, estos pinnípedos no nacen con esas señales distintivas, sino que adquieren sus singulares señas de bravuconería vocal durante la madurez.

Los autores de la investigación grabaron más de 440 cantos de 47 machos de diversas edades en el Parque Estatal de Año Nuevo, en California. En esta colonia de 2000 individuos, un macho dominante llega a competir con medio centenar de grandes rivales, cada uno dotado de su voz propia. Esas vocalizaciones surgen más o menos al mismo tiempo que los adultos delimitan parcelas de unos 20 metros cuadrados, que guardan con celo.

En cambio, los machos jóvenes que ocupan los escalafones bajos mantienen una «discreción acústica», pues solo emiten sonidos breves y desestructurados. Es como si no quisiesen destacar, a la espera de adquirir la madurez suficiente, afirma la autora principal Caroline Casey, graduada en ecología y biología evolutiva de la Universidad de California en Santa Cruz. En torno al octavo o noveno año parecen crear ya su propio canto.

«El canto comienza a surgir cuando tienen posibilidades reales de procrear y ascender en el escalafón», explica Casey.

El reconocimiento viene ni que pintado, pues los machos parecen escuchar atentamente —y evitar— a aquellos congéneres que los han derrotado en combates anteriores. Así pueden reservar sus fuerzas contra los adversarios que reconocen como iguales a ellos.

Casey sospecha que es la naturaleza implacable de la sociedad de los elefantes machos lo que impulsa el desarrollo de las vocalizaciones individuales. Para estudiar ese vínculo, difícil de demostrar, le gustaría analizar también los cantos de otras comunidades menos densas, donde la competencia puede ser menor.

Luke Rendell, biólogo en la Unidad de Investigación de Mamíferos Marinos de la Universidad de St. Andrews, en Escocia, que no ha participado en el estudio, cree que es una posibilidad. Apunta que es posible que esa habilidad para emitir gruñidos diferenciables de los de sus rivales la aprendan de los mayores cuando alcanzan la madurez sexual.

«Presiento que en todo esto hay algo de aprendizaje», afirma Rendell, quien elogia el estudio por haber incluido suficientes datos de elefantes de diversas edades para demostrar claramente la transición de los gruñidos anodinos a los distintivos: «Pensé que era una aportación realmente importante».

—*Chris Baraniuk*

A. FRIEDLAENDER, SERVICIO DE RECURSOS PESQUEROS MARINOS DE EE.UU., AUTORIZACIÓN 19108 PARA LA INVESTIGACIÓN DE MAMÍFEROS MARINOS (*elefantes marinos*); NASA/JPL-CALTECH (*Marte*)

AGENDA

CONFERENCIAS

12 de noviembre
Nanotecnología: Beneficios y riesgos del nanomundo
Pedro Amalio Serena, CSIC
www.csic.es

18 de noviembre
Inteligencia artificial: Retos y riesgos
Héctor Geffner, Universidad Pompeu Fabra
Itziar de Lecuona, Universidad de Barcelona
Museo Nacional de la Ciencia y de la Técnica de Cataluña
mnactec.cat

24 de noviembre – Virtual y presencial
¿Hay vida en Marte? Lecciones aprendidas en análogos terrestres
Felipe Gómez Gómez, CSIC
Museo de las Ciencias
Valencia
www.cac.es



26 de noviembre
Coronavirus emergentes mortales para el hombre: Patología y protección
Luis Enjuanes, CSIC
www.csic.es

EXPOSICIONES

Hasta el 29 de noviembre
Viaje a lo invisible
Museo de Ciencias Naturales
Granollers
www.museugranollersciencies.org

OTROS

Hasta el 20 de noviembre
Yo, Asimov
Concurso de microrrelatos
Convoca: Asociación Catalana de Comunicación Científica
www.accc.cat

Hasta el 23 de noviembre
Concurso de divulgación científica Cienci@ULL
Para jóvenes investigadores de Canarias
Convoca: Universidad de La Laguna
www.ull.es

ARQUEOLOGÍA

¿Cuándo se pobló América?

Nuevos estudios aportan pruebas de que los humanos llegaron al continente más de 20.000 años antes de lo que se creía

RUTH GRUHN



LAS HERRAMIENTAS LÍTICAS halladas en la cueva del Chiquihuite, en México, datadas en unos 27.000 años, junto a otras pruebas, hacen pensar que los humanos llegaron al continente americano mucho antes de lo que se pensaba.

Nuevamente salta a la palestra, gracias a los últimos hallazgos arqueológicos, el debate sobre el poblamiento del continente americano. Recientes estudios publicados en *Nature* por Ciprian F. Ardelean, de la Universidad Autónoma de Zacatecas, y sus colaboradores, por un lado, y por Lorena Becerra-Valdivia y Thomas Higham, de la Universidad de Oxford, por el otro, aportan pruebas de que los humanos poblaron el continente americano antes de la fecha comúnmente aceptada hasta ahora. Algunos datos retrasan la colonización, de hecho, al menos 10.000 años.

El estudio realizado por Becerra-Valdivia y Higham, mediante datación por radiocarbono de yacimientos arqueológicos primitivos, revela que algunas regiones interiores de Alaska, el territorio del Yukón (extremo occidental de Canadá) y la parte continental de los Estados Unidos ya albergaban poblaciones antes de hace 13.000 años. Durante décadas se consideró que esa fecha marcaba la primera entrada posible en el continente, hasta que los datos obtenidos a partir de los años 70 en yacimientos más antiguos, tanto en Norteamérica como en Sudamérica, plantearon la posibilidad de que la llegada fuese anterior.

Las excavaciones realizadas en la cueva del Chiquihuite, en México, por Ardelean y sus colaboradores apuntan a ocupaciones humanas de hace 26.000 años. La cueva mexicana se suma a otra media docena de yacimientos del noreste y centro de Brasil que documentan la presencia humana hace entre 20.000 y 30.000 años.

La cultura de Clovis

Tras los descubrimientos realizados en la década de 1930 en la región estadouni-

LOS PRIMEROS POBLAMIENTOS

DURANTE LA ÚLTIMA GLACIACIÓN, los glaciares cerraban el paso por tierra hacia América, hasta que se abrió un corredor en el hielo. No se sabe si los primeros pobladores se adentraron en el continente por ese corredor, por la ruta costera o antes de que los glaciares cerrasen el paso. Tampoco se sabe cuándo se produjo esa migración. Hace poco se ha publicado un análisis de 42 yacimientos arqueológicos de Norteamérica y Beringia (la masa de tierra que unía Alaska con Siberia en la zona del estrecho de Bering) para demostrar que las poblaciones humanas se habían asentado en esa región mucho antes de lo que se creía hasta ahora. En la figura aparecen algunos yacimientos asociados con ocupaciones humanas tempranas.



dense de las grandes llanuras, donde se encontraron puntas de lanza talladas en piedra del característico diseño vinculado a la cultura de Clovis, junto con huesos de mamuts, mastodontes y una especie de bisonte ahora extinta, los arqueólogos sostuvieron, durante varios decenios, que los primeros habitantes eran hábiles cazadores de piezas mayores y que se extendieron muy rápidamente por la América septentrional y meridional, en los mil años siguientes a su llegada, hace unos 13.000 años. Esta teoría se conoce como el «consenso de Clovis». Posteriormente se constató que la tecnología de Clovis no llegó a Sudamérica. Se creía que su paso desde Alaska a la parte continental de los Estados Unidos coincidió con la apertura de un corredor en el hielo entre el gran manto glaciar septentrional (el Laurentino) y el manto que cubría el extremo norte de las montañas Rocosas (el Cordillerano), en el Canadá occidental.

Sin embargo, a partir de mediados de los 70, comenzaron a investigarse yacimientos que se remontan a más de 13.000 años atrás, sobre todo en Sudamérica. Por ejemplo, el de Monte Verde II, en el sur de Chile, datado inicialmente en 14.500 años, es un asentamiento abierto muy bien conservado, con estructuras de madera y artefactos propios de una vida centrada en la alimentación a base de vegetales (descubrimientos posteriores han revelado ocupaciones aún más antiguas en ese lugar). Otros yacimientos en Sudamérica —en la costa del Pacífico, los tramos septentrional y central de la cordillera de los Andes, el litoral caribeño, la meseta brasileña, la cuenca del Amazonas y las estepas patagónicas de Argentina— indican que todas las grandes áreas geofísicas ya estaban ocupadas hace más de 13.000 años por poblaciones que habían ideado diversas adaptaciones ecológicas y tecnológicas.

¿Cuánto tiempo antes llegaron?

Becerra-Valdivia y Higham han realizado un análisis estadístico de las fechas obtenidas mediante radiocarbono en los yacimientos antiguos de diversas zonas de Norteamérica y Beringia (el puente de tierra que antaño unía Alaska con Siberia en la zona del estrecho de Bering). Sus resultados demuestran que, hace 15.000 años, también Norteamérica estaba ampliamente poblada; algunos datos señalan que ya había poblaciones más dispersas incluso antes, y que hace 13.000 años ya habían surgido tradiciones regionales distintivas en las industrias líticas. A tenor de estos hallazgos, de más de 13.000 años de antigüedad, hay que descartar el consenso de Clovis. Es evidente que ya había poblaciones paleoamericanas mucho antes de que apareciese la tecnología de Clovis en Norteamérica.

En su lugar, la pregunta clave pasa a ser cuánto tiempo antes se pobló el continente. Uno de los aspectos que habrá que estudiar es la ruta o las rutas que siguieron los pobladores hacia el sur de Alaska. Se da por sentado que entraron por esta región tras cruzar la zona del estrecho de Bering. Sin embargo, durante mucho tiempo en el Último Máximo Glacial (hace

entre 26.500 y 19.000 años), la ruta terrestre obvia, que descendía por las llanuras situadas al este de las Rocosas, se hallaba cerrada debido a la unión de los mantos de hielo Laurentino y Cordillerano. La ruta alternativa, a lo largo del litoral del Pacífico y con poblaciones adaptadas a la vida costera, ha ido ganando peso con el aumento de las investigaciones arqueológicas en esas zonas. Otra opción sería que los migrantes hubiesen entrado antes de cerrarse el corredor en el Último Máximo Glacial.

Y aquí es donde encajan los datos de la cueva del Chiquihuite. Después de que las primeras excavaciones pusieran de manifiesto su extraordinaria antigüedad, el equipo de Ardelean continuó investigando con diferentes técnicas. Descubrieron artilugios líticos de una tecnología distintiva en los depósitos sedimentarios más profundos, ubicados en estratos de hace 27.000 años. También hallaron otros artefactos en los estratos superiores, datados en 13.000 años. La datación del estrato más antiguo indica que ya había poblaciones humanas en el norte de México al inicio del Último Máximo Glacial.

Será muy difícil que los especialistas en arqueología americana acepten lo que plantea Ardelean: que los primeros pobladores llegaron hace 33.000 años, un período que duplica la fecha más aceptada actualmente, la de 16.000 años antes del presente. A buen seguro, se cuestionará esa interpretación y se examinarán con lupa los datos obtenidos. Los seis yacimientos brasileños datados en más de 20.000 años, cinco de ellos en la parte central del estado de Piauí y uno en el de Mato Grosso (el abrigo rupestre de Santa Elina) han sido objeto de excavaciones y análisis de gran calidad técnica, pero la mayoría de los arqueólogos los ponen en duda o directamente los ignoran, porque los consideran demasiado antiguos para ser auténticos. Ahora, los hallazgos del Chiquihuite los obligarán a replantearse esta cuestión.

Un interrogante que queda por resolver es por qué no se ha encontrado un yacimiento arqueológico de antigüedad equivalente al del Chiquihuite en la zona continental de los Estados Unidos; si se presupone que los pobladores penetraron en América por el puente de Beringia, debieron de pasar por allí antes de establecerse en lo que hoy es México. Si se favorece la teoría de la ruta costera, se puede suponer que los primeros vestigios arqueológicos están ahora sumergidos por la subida del nivel del mar después de la última glaciación. En cambio, en el interior del continente habría que identificar e investigar enclaves geológicos o paleontológicos de la antigüedad adecuada, para buscar en ellos indicios de presencia humana; y habría que volver a examinar las colecciones y yacimientos que fueron descartados en su momento, a fin de detectar las señales hoy reconocibles del comportamiento humano. A la luz de estos nuevos descubrimientos, es imperativo que se intensifiquen las pesquisas arqueológicas en torno a esta etapa de la humanidad.

Ruth Gruhn *es profesora emérita del Departamento de Antropología de la Universidad de Alberta.*

Artículo original publicado en *Nature* vol. 584, págs. 47-48, agosto de 2020. Traducido con el permiso de Nature Research Group © 2020

Con la colaboración de nature

PARA SABER MÁS

Evidence of human occupation in Mexico around the Last Glacial Maximum. Ciprian F. Ardelean, et al. en *Nature*, 584, págs. 87-92, julio de 2020.
The timing and effect of the earliest human arrivals in North America. Lorena Becerra-Valdivia y Thomas Higham en *Nature*, 584, págs. 93-97, julio de 2020.
Late Pleistocene archaeological discovery models on the Pacific Coast of North America. D. McLaren, et al. en *PaleoAmerica*, vol. 6, n.º 1, págs. 43-63, 2020.

EN NUESTRO ARCHIVO

Los primeros americanos. Sasha Nemecek en *IyC*, noviembre de 2000.
Paleoamericanos y amerindios. Primeros pobladores de América. Rolando González José, Miquel Hernández y Silvina Van der Molen en *IyC*, septiembre de 2004.
Los primeros americanos. Heather Pringle en *IyC*, enero de 2012.

ENERGÍA

La sigilosa combustión del hidrógeno

Las llamas de hidrógeno pueden propagarse en condiciones mucho más adversas que las de otros combustibles. El hallazgo saca a la luz nuevos riesgos en el uso de este gas como recurso energético

FERNANDO VEIGA LÓPEZ, DANIEL MARTÍNEZ RUIZ Y MARIO SÁNCHEZ SANZ

Ya en el siglo XVIII, Lavoisier anticipó la elevada capacidad energética de la oxidación del hidrógeno y observó que dicha reacción generaba solo agua. Dos siglos después, tales características han convertido a este gas en un potencial aliado en la lucha contra el cambio climático. La expansión de las energías solar y eólica permite imaginar un futuro en el que los excedentes de estas fuentes renovables se empleen para producir hidrógeno. Ello haría posible almacenar energía en un combustible libre de emisiones de carbono que, como tal, constituiría una excelente alternativa a los combustibles fósiles.

No obstante, la implantación del hidrógeno como vector energético se enfrenta aún a varios retos; entre ellos, las dificultades técnicas asociadas a su transporte, distribución y almacenamiento. Estas se derivan de su elevada difusividad e inflamabilidad, las cuales lo hacen propenso a filtraciones y conllevan el riesgo de explosiones, como la ocurrida en junio de 2019 en la hidrogenera de Sandvika, cerca de Oslo. Así pues, la capacidad de controlar y minimizar los riesgos será determinante a la hora de aprovechar el hidrógeno como combustible.



LLAMAS SUTILES: La combustión del hidrógeno (*en la imagen, una llama generada en un laboratorio*) no produce dióxido de carbono, pero la alta inflamabilidad de este gas entraña algunos peligros. Ahora, un nuevo trabajo ha descubierto que sus llamas pueden formar estructuras fractales que permiten su propagación en canales de anchura milimétrica y con concentraciones muy bajas de combustible.

GETTY IMAGES/JXFZSY/ISTOCK

En un trabajo reciente publicado en *Physical Review Letters* junto con Mike Kuznetsov y Joachim Grune, del Instituto de Tecnología de Karlsruhe, y Eduardo Fernández-Tarrazo, de la Universidad Carlos III de Madrid, hemos descubierto otra posible fuente de riesgo: la inusual capacidad de las llamas de hidrógeno para propagarse en espacios muy estrechos y con concentraciones bajas de combustible. Este fenómeno, que no se observa en los hidrocarburos, se debe a que las llamas de hidrógeno pueden dar lugar a estructuras fractales o a pequeñas bolsas de gas que permiten que la reacción se mantenga incluso en condiciones muy adversas. Tales circunstancias pueden darse en pequeñas fugas de combustible y en dispositivos que usen hidrógeno como fuente de energía.

Llamas confinadas

La combustión es una reacción química que tiene lugar entre dos agentes, el combustible y el oxidante. En el proceso se liberan grandes cantidades de calor en regiones muy delgadas que identificamos como llamas. Ese calor, que en un primer momento se acumula en la zona de la reacción y provoca un aumento de la temperatura, termina por transmitirse al gas cercano por conducción o por radiación. Al mismo tiempo, los reactantes se desplazan desde las regiones de mayor concentración hacia la zona de reacción, donde se consumen y liberan energía. Como resultado, el proceso genera dióxido de carbono y agua o, en el caso del hidrógeno, únicamente agua.

Con el objetivo de medir el riesgo asociado al uso de distintos combustibles gaseosos, nos propusimos estudiar las llamas de varios de ellos (metano, propano, éter dimetílico e hidrógeno) en canales estrechos a fin de simular situaciones de riesgo tras una fuga. Para ello, diseñamos una cámara de combustión compuesta por dos grandes placas separadas por una corta distancia regulable (menos de un centímetro). Dicha cámara se llenaba con una mezcla de combustible y aire de proporciones conocidas. Tras desencadenar la ignición con una bujía, la reacción era grabada con una cámara de alta velocidad para su análisis posterior.

En este montaje experimental, el calor liberado por la llama puede modificarse regulando la composición de la mezcla de gases. Por otro lado, disminuir la distancia entre las placas aumenta las fugas de calor a través de las paredes. La competición entre la generación de calor por la combustión y la pérdida del mismo a través de las paredes determina si el resultado de la reacción es una llama vigorosa y autosostenida entre las placas, o una cada vez más débil que acaba por extinguirse.

La singularidad del hidrógeno

La evaluación de ese balance resulta no ser tan sencilla en el caso del hidrógeno.

A diferencia de los hidrocarburos, la pequeña masa de la molécula de H_2 se asocia con una gran velocidad de difusión, lo que permite su transporte desde las regiones de alta concentración de combustible hacia la llama. Esto facilita el progreso de la reacción química y hace que las llamas puedan sobrevivir en condiciones mucho más adversas que las soportadas por otros combustibles menos difusivos.

Por otro lado, en los combustibles con base de carbono solemos identificar la delgada zona de reacción —la llama— gracias a la emisión de luz de ciertas moléculas cuya excitación electrónica hace que radien en el espectro visible. En el caso del hidrógeno, sin embargo, la ausencia de carbono provoca que la emisión sea mucho menos intensa, lo que dificulta enormemente su observación en eventos de corta duración. El problema es aún mayor cuando reducimos la concentración de combustible, ya que eso deriva en una llama más débil.

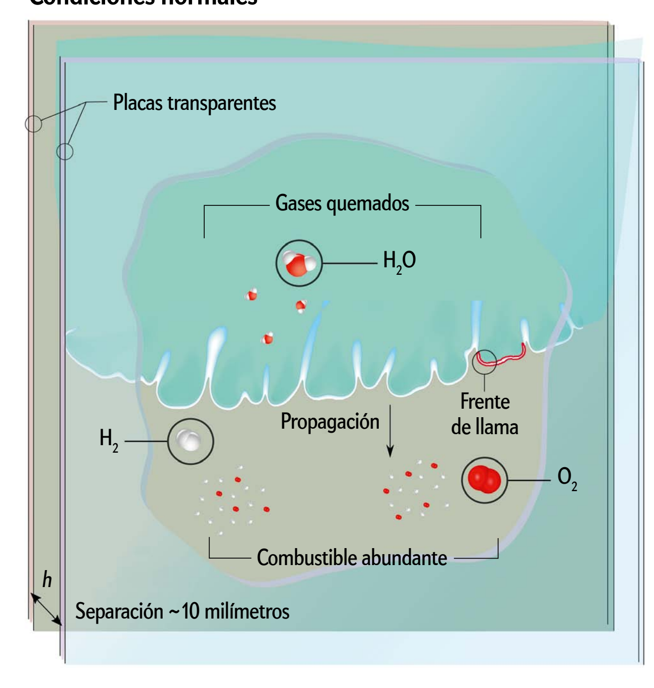
Como alternativa a la observación directa, empleamos la técnica de visualización schlieren (*Schlieren* significa «estrías» en alemán). Este método permite identificar variaciones bruscas en el coeficiente de refracción de la luz inducidas por cambios de densidad, una propiedad muy útil a la hora de detectar frentes de reacción. Al combinar esta técnica con grabaciones de alta velocidad, fuimos capaces de describir la compleja dinámica de las llamas de hidrógeno. En estas, además, el vapor de agua obtenido en la combustión condensa sobre las paredes de la cámara, dejando una fina capa de agua líquida de mucha mayor densidad que dibuja la trayectoria seguida por las llamas y facilita la detección de estas. Ese rastro, además, proporciona una medida aproximada de la cantidad de combustible consumido.

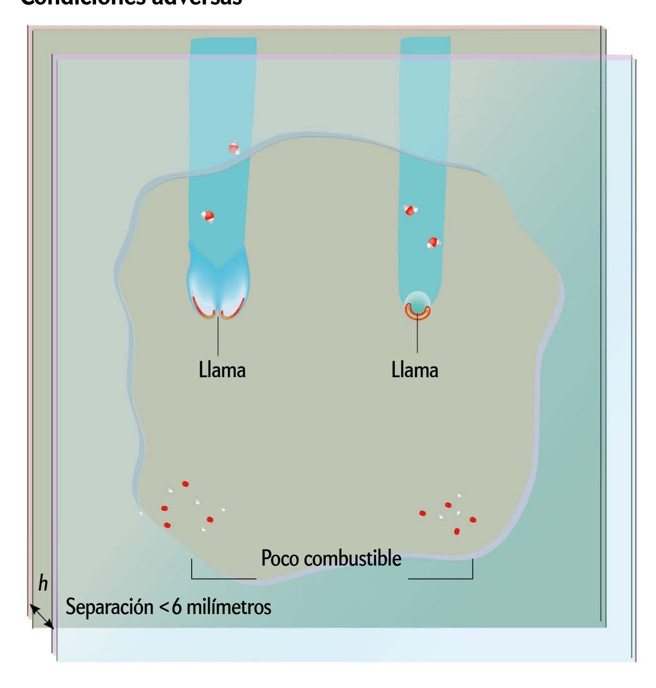
Llamas fractales

En su forma de propagación común, las llamas de hidrógeno forman un frente continuo y muy delgado que separa los gases ya quemados de la mezcla aún sin quemar. Sin embrago, al reducir la distancia entre las placas y la concentración de combustible, hallamos dos formas de propagación hasta ahora desconocidas. En la primera, las llamas forman ramificaciones fractales, similares a las observadas en poblaciones de bacterias y hongos en condiciones de escasez de alimento. En la segunda, al disminuir aún más dichos parámetros, las ramificaciones desaparecen y emergen células alargadas de gas (con una o dos cabezas) que avanzan a velocidad constante y mantienen la débil reacción química.

Estas pequeñas llamas constituyen diminutas bolsas de gas a alta temperatura (por encima de los 700 grados Celsius) rodeadas de gas sin quemar a temperatura ambiente. Nuestros experimentos han revelado que pueden atravesar ranuras milimétricas y sobrevivir con concentraciones de apenas un 5 por ciento de combustible. Esta inusitada capacidad de propagación, ausente en los hidrocarburos, introduce un riesgo a tener en cuenta en aquellas aplicaciones en las que el depósito de combustible no esté muy alejado del punto de uso del hidrógeno.

La creciente inversión en producción, transporte y almacenamiento de hidrógeno en varios países del mundo anticipa un rápido desarrollo tecnológico en torno a este combustible. Sin embargo,





MONTAJE EXPERIMENTAL: Para analizar la propagación del hidrógeno (H_2) en condiciones adversas, se introduce una mezcla de aire y combustible entre dos grandes placas transparentes separadas una pequeña distancia (*h*). La reacción entre el oxígeno (O_2) y el H_2 produce agua (H_2O). En condiciones normales (*izquierda*), la llama crea un frente continuo que separa la mezcla de gases ya quemados (*turquesa, arriba*) de la mezcla aún sin quemar (*marrón, abajo*). Cuando el espacio disponible y la concentración de combustible disminuyen (*derecha*), las llamas pueden pervivir en forma de diminutas bolsas de gas (*azul*) a alta temperatura. Las pérdidas de calor a través de las paredes, las cuales pueden aumentarse acortando la distancia entre las placas, desempeñan un papel clave en la transición entre los distintos regímenes de combustión.

Propagación común | Propagación fractalizada | Propagación estacionaria

Hacia abajo

Hacia arriba

REGÍMENES DE PROPAGACIÓN: En su forma de propagación común (*izquierda*), las llamas de hidrógeno dan lugar a un frente continuo que separa los gases ya quemados (*zona oscura*) de la mezcla aún sin quemar (*zona clara*). Sin embargo, al disminuir progresivamente la anchura de la cámara y la concentración de combustible, dicho frente se fragmenta y aparecen ramificaciones de tipo fractal (*centro*), así como células aisladas de gas a alta temperatura (*derecha*). Estas avanzan a velocidad constante y mantienen la reacción en condiciones que serían inviables para otros combustibles. Estas imágenes de alta velocidad, obtenidas con la técnica schlieren, muestran que tales regímenes aparecen tanto si las llamas se propagan en el sentido de la gravedad (*fila superior*) como si lo hacen en sentido contrario (*fila inferior*).

CORTESÍA DE LOS AUTORES

ello solo será viable si somos capaces de controlar los riesgos asociados. La localización del tipo de llamas aisladas que describe nuestro trabajo es complicada, y no conocemos ninguna solución técnica que permita detectarlas y eliminarlas lo suficientemente rápido. Desde un punto de vista práctico, cabe recomendar sistemas de prevención que incluyan aumentar la ventilación, reducir el volumen donde se pueda acumular el hidrógeno, instalar sensores para detectar la presencia de gas inflamable y evitar al máximo los puntos calientes.

El descubrimiento abre la puerta a nuevas líneas de investigación. Por un lado, extenderemos el estudio de los límites que definen este tipo de propagación a canales todavía más estrechos y usando combustibles con propiedades distintas a las del hidrógeno puro. Por otro, y con vistas a la prevención de accidentes catastróficos, estamos explorando el diseño de nuevos recubrimientos capaces de absorber en su superficie radicales químicos clave para el desarrollo de la combustión. Ello ralentizaría la reacción, dificultaría la propagación de las llamas y reduciría considerablemente el riesgo de explosiones.

***Fernando Veiga López** y **Mario Sánchez Sanz** investigan en el Departamento de Ingeniería Térmica y de Fluidos de la Universidad Carlos III de Madrid. **Daniel Martínez Ruiz** investiga en la Escuela Técnica Superior de Ingeniería Aeronáutica y del Espacio de la Universidad Politécnica de Madrid.*

PARA SABER MÁS

Effect of Lewis number on ball-like lean limit flames. Zhen Zhou et al. en *Combustion and Flame*, vol. 188, págs. 77-89, febrero de 2018.

The role of conductive heat losses on the formation of isolated flame cells in Hele-Shaw chambers. Daniel Martínez-Ruiz et al. en *Combustion and Flame*, vol. 209, págs. 187-199, noviembre de 2019.

Unexpected propagation of ultra-lean hydrogen flames in narrow gaps. Fernando Veiga-López et al. en *Physical Review Letters*, vol. 124, art. n.º 174501, mayo de 2020.

EN NUESTRO ARCHIVO

Sistemas de almacenamiento energético. Ferdi Schüth en *IyC*, septiembre de 2012.

Hidrógeno: ¿una energía limpia para el futuro? Vincent Artero, Nicolas Guillet, Daniel Fruchart y Marc Fontecave en *IyC*, octubre de 2012.

La solución del H_2. Peter Fairley en *IyC*, abril de 2020.

Presentación

CIENCIA: GRANDES HITOS Y PRÓXIMOS RETOS

A punto de terminar un año aciago, marcado por una pandemia que ha desbaratado el mundo entero, *Investigación y Ciencia* presenta un número especial sobre grandes ideas científicas: ideas que han cambiado nuestra visión del mundo durante los dos últimos siglos y que están guiando el diseño de las estrategias que nos permitirán afrontar los principales retos de la humanidad, incluida la pandemia de COVID-19. La ciencia, una de las formas de conocimiento más poderosas que ha desarrollado el ser humano, es y será —pese a ciertos discursos basados en falsedades y pseudoconocimiento ideologizado— una pieza clave de nuestro avance. Siete expertos procedentes de campos tan diversos como la cosmología, la medicina, la ecología, la tecnología o la filosofía nos ofrecen en las páginas que siguen un recorrido global y panorámico por la ciencia más transformadora.

El primer artículo (Rees, *pág. 20*) revisa los descubrimientos astronómicos que han ido configurando nuestra comprensión del universo, de sus constituyentes fundamentales, de las leyes físicas que lo gobiernan y de los astros que alberga. Asimismo, plantea algunas de las cuestiones todavía abiertas, como las relacionadas con la materia oscura, la existencia de un multiverso o la vida extraterrestre. Del cosmos pasamos a nuestro planeta: un repaso a las extinciones masivas que han marcado la historia de la Tierra nos alerta sobre el futuro de la vida, amenazada hoy por los niveles de dióxido de carbono y la pérdida de biodiversidad (Brannen, *pág. 28*). Y de la evolución geológica a la evolución de nuestra especie: el tercer artículo de este monográfico presenta los descubrimientos paleontológicos y genéticos que han arrojado luz sobre nuestros orígenes y que están permitiendo resolver el complejo rompecabezas de la familia humana (Wong, *pág. 36*).

A continuación llegan dos artículos centrados en las epidemias, uno de los principales desafíos a los que se enfrenta hoy nuestra sociedad. Tras el desarrollo de los antibióticos y las vacunas a lo largo del siglo xx, se auguraba que las enfermedades infecciosas dejarían de ser una de las principales causas de mortalidad humana. Sin embargo, varias epidemias posteriores, entre ellas la de COVID-19, han desmentido ese pronóstico (McKenna, *pág. 46*). Para contenerlas no bastarán los acelerados esfuerzos que está realizando la medicina, sino que también deberán corregirse los factores que propician la aparición de nuevas enfermedades. Entre estos destacan la pobreza y las desigualdades sociales, y, sobre todo, la ocupación y la explotación humanas del medioambiente, que han desestabilizado los ecosistemas y el hábitat de los animales (Terradas, *pág. 52*).

No podía faltar en este monográfico un repaso de los avances tecnológicos que, como la electricidad, las telecomunicaciones o la computación, más nos han cambiado la vida (Oreskes, *pág. 60*). Se trata de innovaciones que, en última instancia, han servido para impulsar la transmisión de información e ideas. Y para bien o para mal, esa información ilimitada está transformando nuestra sociedad al difuminar las fronteras entre lo público y lo privado, entre creadores y consumidores o entre profanos y expertos.

Para concluir, un artículo de corte filosófico ahonda en las ideas relacionadas con la naturaleza humana (Marcos, *pág. 68*). La concepción de lo que significa ser humano, muy influida por el desarrollo de la ciencia y la tecnología, ha viajado desde un optimismo inicial al descreimiento posmoderno actual. Solo una visión que integre también las ciencias humanas y sociales podrá aportar la claridad que precisamos en cuanto a nuestra propia imagen.

—La redacción


ELLEN WEINSTEIN

ASTRONOMÍA

NUESTRA VISIÓN *del* COSMOS

ASÍ DESCUBRIERON LOS ASTRÓNOMOS UN UNIVERSO MUCHO MÁS GRANDE Y EXTRAÑO DE LO QUE NADIE SOSPECHABA

Martin Rees

Ilustración de Maria Corte


N
W
E
S

Martin Rees es astrofísico. Desde 1995 ocupa el puesto de Astrónomo Real del Reino Unido, y ha sido rector del Trinity College de la Universidad de Cambridge y presidente de la Real Sociedad de Londres. Es autor de nueve libros, entre ellos *En el futuro: Perspectivas para la humanidad* (Crítica, 2019).



En 1835, el filósofo francés Auguste Comte afirmó que nadie sabría nunca de qué estaban hechas las estrellas. «Concebimos la posibilidad de determinar sus formas, sus distancias, sus tamaños y sus movimientos», escribió, «pero nunca tendremos manera de estudiar su composición química o su estructura mineralógica, y menos aún la naturaleza de los cuerpos organizados que vivan en su superficie».

Los descubrimientos realizados desde entonces dejarían a Comte sin palabras. Hoy sabemos que el universo es mucho más grande y extraño de lo que nadie sospechaba: no solo se extiende más allá de la Vía Láctea y da cabida a innumerables galaxias —lo que habría sorprendido a los astrónomos del siglo xix y principios del xx, para quienes nuestra galaxia era «el universo»—, sino que además se expande cada vez más rápido.

Podemos detallar con confianza lo que ha ocurrido en los últimos 13.800 millones de años de historia cósmica, desde una milmillonésima de segundo después de la gran explosión. Los astrónomos han medido con una precisión del uno o dos por ciento el ritmo de expansión del universo, la densidad media de sus principales constituyentes y otros parámetros clave. También han hallado nuevas leyes físicas que gobiernan el espacio (la relatividad general y la mecánica cuántica) y que han resultado ser mucho menos intuitivas que las leyes clásicas conocidas anteriormente. A su vez, esas leyes predijeron rarezas cósmicas como los agujeros negros, las estrellas de neutrones o las ondas gravitacionales. La historia de cómo adquirimos estos conocimientos está llena de descubrimientos accidentales, sensacionales sorpresas y científicos tenaces que persiguieron metas que otros creyeron inalcanzables.

La primera pista sobre la verdadera naturaleza de las estrellas llegó en 1860, cuando Gustav Kirchhoff comprendió que las líneas oscuras que aparecían en el espectro de la luz solar correspondían a la absorción de determinadas longitudes de onda por parte de diferentes elementos químicos [*véase* «Los orígenes de la espectroscopía (II): De la química a la astrofísica moderna», por Dietrich Lemke; Investigación y Ciencia, febrero de 2016]. Los astrónomos analizaron características similares en la luz de otras estrellas brillantes y descubrieron que estaban hechas de los mismos materiales que encontramos en la Tierra, no de ninguna misteriosa «quintaesencia», como creían los antiguos.

Entender por qué brillaban las estrellas llevó más tiempo. Lord Kelvin (William Thomson) estimó que si las estrellas obtenían su energía exclusivamente a partir de la gravedad, contrayéndose poco a poco a medida que emitían radiación, el Sol tendría entre 20 y 40 millones de años, una edad mucho menor que la que Charles Darwin o los geólogos de la época habían estimado para la Tierra. Sin embargo, Lord Kelvin incluyó una especie de «cláusula de escape», al reafirmarse en su cálculo «a no ser que hubiera otra fuente de energía disponible en el almacén de la creación».

EN SÍNTESIS

En los dos últimos siglos ha cambiado notablemente nuestra visión del universo y sus constituyentes fundamentales, así como de las leyes físicas que lo gobiernan y los astros que alberga.

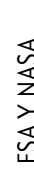
Sin embargo, aún tenemos muchas preguntas: no sabemos cuál es la naturaleza de la materia oscura o el destino del cosmos, si vivimos en un multiverso o si existe vida en otros planetas.

El ritmo de los descubrimientos no ha dejado de aumentar, impulsado por los avances en técnicas e instrumentos. Eso nos permite seguir escribiendo una de las páginas más brillantes de la historia de la ciencia.

¿CUÁL ES LA FUENTE DE ENERGÍA DEL SOL? La respuesta, la fusión nuclear, llegó en 1938.

Esa fuente resultó ser la fusión nuclear, el proceso por el que los núcleos atómicos se unen para crear otro mayor y liberan energía. En 1925, la astrofísica Cecilia Payne-Gaposchkin usó los espectros de las estrellas para calcular su composición química y concluyó que, a diferencia de la Tierra, estaban hechas sobre todo de hidrógeno y helio. Reflejó estos resultados en su tesis doctoral, que el astrónomo Otto Struve describió como «la más brillante que jamás se haya escrito en astronomía». Una década después, el físico Hans Bethe demostró que la fusión de núcleos de hidrógeno para formar helio era la principal fuente de energía de las estrellas ordinarias.

A la vez que las estrellas iban volviéndose menos misteriosas, también se esclarecía la naturaleza de las «nebulosas». En el Gran Debate celebrado ante la Academia Nacional de Ciencias de Estados Unidos el 26 de abril de 1920, Harlow Shapley defendió la preeminencia de nuestra Vía Láctea y afirmó que todas las nebulosas formaban parte de ella. Por el contrario, Heber Curtis sostuvo que algunos de esos difusos objetos celestes eran galaxias independientes («universos isla») análogas a nuestra Vía Láctea. La cuestión no se zanjó aquella noche, sino algunos años más tarde, en 1924, cuando Edwin Hubble midió la distancia a una serie de nebulosas y demostró que se encontraban más allá de los confines de la Vía Láctea. Para ello se sirvió de las cefeidas que había en las nebulosas, unas estrellas variables cuyo período de pulsación está relacionado con su brillo real (y, por lo tanto, con su distancia), como había descubierto Henrietta Swan Leavitt.



Poco después de demostrar que el universo era mayor de lo que muchos pensaban, Hubble descubrió que además estaba creciendo. En 1929 se dio cuenta de que las líneas espectrales en la luz estelar que nos llega desde las galaxias distantes aparecían desplazadas hacia el rojo (es decir, tenían mayores longitudes de onda) respecto a las líneas observadas en la luz de las estrellas próximas. Interpretándolo en términos del efecto Doppler (el alargamiento de la longitud de onda que presenta la luz procedente de una fuente que se aleja), eso implicaba que el resto de galaxias se estaban separando unas de otras y de nosotros. De hecho, cuando más lejos se encontraba la galaxia, más rápida parecía su recesión. Esa fue la primera pista de que nuestro cosmos no era estático, sino que estaba en continua expansión.

El universo también parecía contener mucha materia que no podíamos ver. En 1933, Fritz Zwicky estimó la masa de todas las estrellas del cúmulo de galaxias de Coma y encontró que constituía solo en torno al uno por ciento de la necesaria para que dicho cúmulo no se dispersase. Pero la propuesta de Zwicky de que este «problema de la masa faltante» podía deberse a la existencia de materia oculta no convenció a muchos científicos del momento. La cuestión permaneció abierta hasta la década de 1970, cuando el trabajo de Vera Rubin y W. Kent Ford (observando estrellas) y de Morton Roberts y Robert Whitehurst (mediante observaciones de radio) mostró que la parte exterior de los discos galácticos también se dispersaría si no estuviese sometida a una atracción gravitacional mayor que la producida

por las estrellas y el gas [*véase* «Materia oscura en galaxias espirales», por Vera C. Rubin; Investigación y Ciencia, agosto de 1983]. Al final, la mayoría de los astrónomos se vieron obligados a aceptar la presencia de algún tipo de «materia oscura». Como escribió Rubin, «nos hemos asomado a un mundo nuevo, y hemos visto que es más misterioso y complejo de lo que habíamos imaginado». En la actualidad, los científicos creen que la materia oscura es unas cinco veces más abundante que la materia visible, aunque no sabemos mucho más sobre su naturaleza que en la década de 1930.

La gravedad, la fuerza que reveló la existencia de la materia oscura, ha resultado casi igual de desconcertante. En 1915 tuvo lugar un hito crucial: la publicación de la teoría general de la relatividad de Albert Einstein, que iba más allá de la mecánica de Isaac Newton y ponía de manifiesto que la gravedad no es más que la deformación del tejido del espacio y el tiempo [*véase* «Sobre la teoría generalizada de la gravitación», por Albert Einstein; Investigación y Ciencia, noviembre de 2015]. La nueva teoría tardó en afianzarse; incluso después de que las observaciones del eclipse solar de 1919 la confirmaran, muchos la consideraban solo una rareza interesante: al fin y al cabo, las leyes de Newton seguían bastando para la mayoría de los cálculos. Tras el eclipse, el astrónomo W. J. S. Lockyer declaró al *New York Times* que «los descubrimientos, aun siendo muy importantes, no tienen consecuencia alguna en la Tierra». Durante casi medio siglo, la relatividad general fue excluida de la corriente principal de la física. Pero a partir de la década de 1960, los astrónomos comenzaron a descubrir fenómenos nuevos y extremos que solo podían explicarse con las ideas de Einstein.

Un ejemplo se escondía en la nebulosa del Cangrejo, uno de los objetos más conocidos del cielo, compuesto por los restos en expansión de una supernova que observaron los astrónomos chinos en el año 1054. Desde que apareció, la nebulosa ha estado emitiendo una brillante luz azul, cuyo origen constituyó un misterio durante mucho tiempo. La solución llegó en 1968, cuando se descubrió que la tenue estrella que alberga en su centro no es ni mucho menos normal: se trata de una estrella de neutrones, un cuerpo ultracompacto (más pesado que el Sol, pero con un radio de tan solo unos pocos kilómetros) que rota 30 veces por segundo. «Era un tipo de objeto completamente nuevo e inesperado, que se comportaba de un modo que los astrónomos no habían podido prever ni imaginar», afirmó Jocelyn Bell Burnell, una de las descubridoras del fenómeno. El intenso giro de la estrella genera un viento de electrones que produce la luz azul. La fuerza de la graviedad en la superficie de un objeto tan denso excede con mucho lo que puede describir la teoría de Newton (para que un cohete pudiera vencer la atracción, habría que lanzarlo a la mitad de la velocidad de la luz), de modo que es imprescindible tener en cuenta los efectos relativistas predichos por Einstein. Se han encontrado miles de estas estrellas giratorias, llamadas púlsares; se cree que se forman a partir de los núcleos de las estrellas que explotan como supernovas, y ofrecen un laboratorio ideal para estudiar las leyes de la naturaleza en condiciones extremas.

El resultado más exótico de la teoría de Einstein fue la noción de los agujeros negros, objetos que han colapsado hasta tal extremo que ni siquiera la luz puede escapar de su atracción gravitatoria. Durante decenios no fueron más que una conjetura, y en 1939 Einstein escribía que «no existen en la realidad física». Pero en 1963, los astrónomos descubrieron los cuásares, faros ultraluminosos situados en el centro de algunas galaxias. Tuvo que pasar más de una década hasta que se alcanzó un consenso sobre el origen de su intenso brillo: proviene del gas que se arremolina en torno a enormes agujeros negros ocultos en el corazón de las galaxias. Era el indicio más sólido hasta la fecha de que esa extraña predicción de la relatividad general realmente existía. Hoy la existencia de los agujeros negros está fuera de toda duda, y Roger Penrose, Reinhard Genzel y Andrea Ghez acaban de ganar el premio Nobel de física por sus investigaciones sobre ellos.



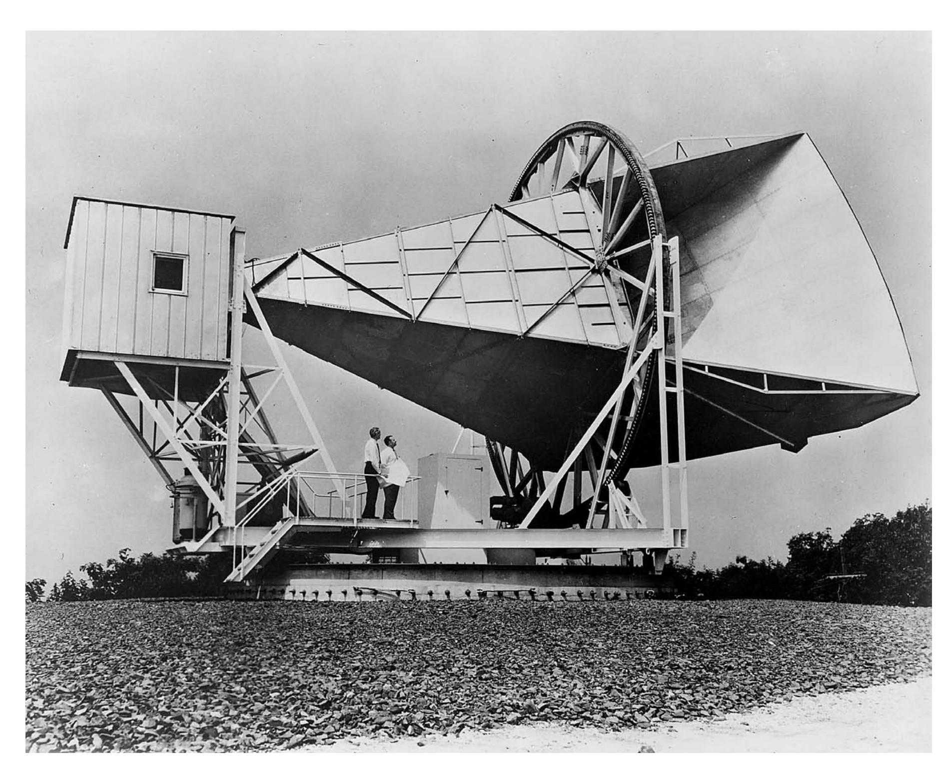
EN LA NEBULOSA DEL CANGREJO hay una estrella de neutrones, donde falla la física clásica y es necesario aplicar la relatividad.

ESO

¿Cuándo comenzó el universo? ¿Tuvo siquiera un inicio? Los astró-

nomos ya habían debatido largo y tendido sobre estas cuestiones cuando, a mediados del siglo xx, se propusieron dos teorías que ofrecían respuestas muy diferentes. El modelo de la gran explosión afirmaba que el cosmos comenzó siendo muy pequeño, caliente y denso, y que con el tiempo se había expandido y enfriado. Mientras, la hipótesis del estado estacionario mantenía que el universo había existido desde siempre, con el mismo aspecto que presenta hoy en día.

La disputa se dirimió gracias a un descubrimiento casual. En 1965, los radioastrónomos Arno Penzias y Robert Wilson trataban de calibrar una nueva antena en los Laboratorios Bell de Nueva Jersey. Tenían un problema: por mucho que intentaban reducir las interferencias de fondo, no dejaban de detectar un ruido de intensidad constante en todas direcciones. Incluso desalojaron a una familia de palomas que habían anidado en la antena, con la esperanza de que fueran el origen del problema. Pero la señal persistía. Habían descubierto que el espacio intergaláctico no está totalmente frío: una débil radiación de microondas lo mantiene a una temperatura de unos tres kelvin (justo por encima del cero absoluto). Penzias y Wilson habían hallado accidentalmente los «rescoldos de la creación», los vestigios enfriados y diluidos de una era en la que todo estaba comprimido y presentaba una alta densidad y temperatura.



ANTENA DE LOS LABORATORIOS BELL, en Nueva Jersey, con la que Arno Penzias y Robert Wilson descubrieron en 1965 el fondo cósmico de microondas: una radiación que llena el universo y que revela cómo era el cosmos 300.000 años después de la gran explosión.

NASA/DOMINIO PÚBLICO

Este descubrimiento inclinó la balanza de manera concluyente hacia la teoría de la gran explosión. Según este modelo, durante sus compases iniciales y más calientes, el universo era opaco (como el interior de una estrella), ya que la luz era dispersada una y otra vez por los electrones libres. Pero cuando la temperatura cayó hasta los 3000 kelvin, los electrones se ralentizaron lo bastante como para que los protones los atraparan y dieran lugar a átomos neutros. A partir de ese momento, la luz pudo viajar libremente. La señal detectada en los Laboratorios Bell correspondía a esa luz primigenia, liberada unos 300.000 años después del nacimiento del universo y que todavía lo impregna: el llamado fondo cósmico de microondas. Los científicos que lo hallaron tardaron un tiempo en comprender la magnitud del descubrimiento. «Estábamos encantados de tener una posible explicación [para el ruido de la antena], pero creo que al principio ninguno de los dos nos tomábamos muy en serio las implicaciones cosmológicas», afirma Wilson. «Walter Sullivan escribió un artículo sobre ello en la portada del *New York Times*, y en ese momento pensé que quizás debería empezar a pensar seriamente en la cosmología.»

Desde entonces, las medidas de esta radiación han permitido a los científicos entender cómo surgieron las galaxias. Las observaciones precisas del fondo de microondas ponen de manifiesto que no es completamente uniforme a lo largo del cielo: algunas regiones están un poco más calientes y otras un poco más frías. Aunque la amplitud de estas fluctuaciones es de tan solo una parte en 100.000, son las semillas de las estructuras que vemos hoy en el cosmos. Las regiones del universo que eran un poco más densas que la media se expandieron menos, al estar sometidas a una gravedad adicional. Su crecimiento se fue retrasando más y más, y la diferencia entre su densidad y la de su entorno se hizo cada vez mayor. Con el tiempo, estas regiones se volvieron lo bastante densas como para atraer gas y comprimirlo para formar estrellas, dando lugar así a las galaxias. El punto crucial es que, cuando introducimos las fluctuaciones observadas en el fondo de microondas (que revela cómo era el universo cuando tenía 300.000 años) como dato inicial en las simulaciones que reproducen la formación de estructura y dejamos que transcurran 13.800 millones de años virtuales, obtenemos un cosmos con galaxias parecidas a las que vemos hoy en día, agrupadas en cúmulos como los del universo real. Y eso supone que comprendemos, al menos a grandes rasgos, el 99,998 por ciento de la historia cósmica. Es todo un triunfo.

Pero el universo en su conjunto no es lo único que hemos llegado a entender. Una serie de descubrimientos también nos han revelado la historia de los constituyentes fundamentales de las estrellas, los planetas, e incluso nuestros propios cuerpos.

A partir de la década de 1950, los avances en física atómica dieron lugar a modelos precisos de las capas superficiales de las estrellas. Al mismo tiempo, el conocimiento detallado del núcleo atómico (no solo del hidrógeno y el helio, sino también del resto de elementos) permitió a los científicos calcular las reacciones nucleares dominantes en los diferentes estadios de la vida de una estrella. Los astrónomos lograron comprender cómo la fusión nuclear crea una estructura de capas en las estrellas masivas a medida que los átomos se unen para producir elementos cada

vez más pesados, hasta llegar al hierro, que ocupa la región más interna y caliente.

Otra cosa que descubrieron es cómo mueren las estrellas cuando consumen su combustible de hidrógeno y expulsan sus capas más externas. Las estrellas más ligeras se estabilizan y dan lugar a objetos tenues y densos conocidos como enanas blancas, pero las más pesadas pierden una mayor cantidad de masa, ya sea en forma de vientos durante su etapa activa o en su explosiva muerte como supernova. Esa materia expelida resulta crucial para nuestra propia existencia, puesto que se dispersa por el medio interestelar y se condensa en nuevas estrellas, alrededor de las cuales orbitan planetas como la Tierra. Esta idea fue concebida por Fred Hoyle, que la desarrolló durante la década de 1950 junto a otros dos astrónomos británicos, Margaret y Geoffrey Burbidge, y al físico nuclear estadounidense William Fowler. En un artículo clásico, publicado en 1957 en *Reviews of Modern Physics* (y conocido por las iniciales de sus autores, BBFH), analizaron la cadena de reacciones nucleares implicadas y describieron cómo se habían formado la mayoría de los átomos de la tabla periódica. Por ejemplo, calcularon por qué el oxígeno y el carbono son comunes, mientras que el oro y el uranio escasean. Resulta que nuestra galaxia es un gigantesco ecosistema donde el gas se recicla en sucesivas generaciones de estrellas, y cada uno de nosotros contiene átomos creados en decenas de astros de la Vía Láctea que vivieron y murieron hace más de 4500 millones de años.

A no ser que la vida en la Tierra sea fruto de una tremenda casualidad, creo que encontraremos indicios de una biosfera en algún exoplaneta en los próximos 20 años

Los científicos suponían que este proceso sembraría planetas (y tal vez incluso vida) alrededor de otras estrellas, pero no supimos con certeza si existían planetas fuera de nuestro sistema solar hasta la década de 1990, cuando los astrónomos desarrollaron métodos inteligentes para identificar mundos que eran demasiado tenues para verlos directamente. Una de estas técnicas busca diminutos cambios periódicos en el movimiento de una estrella, causados por la atracción gravitatoria de un planeta en órbita. En 1995, Michel Mayor y Didier Queloz usaron esta estrategia para detectar 51 Pegasi b, el primer exoplaneta conocido en torno a una estrella similar al Sol. La técnica puede revelar la masa del planeta, la duración de su «año» y la forma de su órbita, y ya ha servido para detectar más de 800 mundos.

Hay otro método que funciona mejor con exoplanetas más pequeños, basado en que las estrellas se atenúan cuando un mundo en órbita pasa por delante de ellas. Para un planeta del tipo de la Tierra y una estrella similar al Sol, la disminución del brillo es de una parte en 10.000 en cada órbita. El telescopio espacial Kepler, lanzado en 2009, ha usado esta técnica para encontrar más de 2000 planetas, muchos de los cuales no son más grandes que el nuestro. El éxito de los astrónomos en la detección de exoplanetas ha revelado una enorme variedad de mundos, muchos de ellos más grandes y cercanos a sus estrellas que los cuerpos de nuestro sistema solar, lo que sugiere que nuestro vecindario cósmico podría ser un tanto especial.

Llegados a este punto, los científicos habían entendido el origen de casi todos los elementos que forman los planetas, las estrellas y las galaxias. Sin embargo, la pieza final del rompecabezas ha llegado recientemente, gracias a una investigación que no parecía estar relacionada con el problema.

La relatividad general había predicho la existencia de ondas gravitacionales, perturbaciones en el espaciotiempo producidas por el movimiento de objetos masivos. Aunque se buscaron durante décadas, no se detectó ninguna... hasta septiembre de 2015. En esa fecha, el Observatorio de Ondas Gravitacionales por Interferometría Láser (LIGO) detectó la primera prueba de las ondas gravitacionales a través de un «chirrido», una minúscula agitación del espaciotiempo que surge y luego desaparece. En ese caso, la señal se debió a dos agujeros negros que comenzaron a orbitar el uno alrededor del otro y se fueron acercando poco a poco, hasta acabar fundiéndose en un único agujero negro masivo. (La colisión ocurrió a más de mil millones de años luz de la Tierra.) Los detectores de LIGO están formados por espejos situados a cuatro kilómetros de distancia, cuya separación se mide con un haz láser que se refleja entre ellos. El paso de una onda gravitacional modifica el espacio entre los dos espejos en una cantidad millones de veces más pequeña que el diámetro de un átomo. LIGO es sin duda un hito de la ingeniería de precisión y de la perseverancia humana.

Desde esa primera detección, se han observado más de una docena de eventos similares, lo que ha dado lugar a un nuevo campo que explora la dinámica del propio espacio. Uno de estos sucesos tuvo un especial interés para la astrofísica, ya que correspondió a la fusión de dos púlsares. La colisión entre dos estrellas ultradensas (a diferencia de lo que ocurre con los agujeros negros) produce un pulso de luz visible, rayos X y rayos gamma. El descubrimiento llenó un vacío en el trabajo clásico de BBFH: los autores habían explicado la génesis de muchos de los elementos presentes en el espacio, pero les desconcertaba la formación del oro. En la década de 1970, David N. Schramm y sus colaboradores especularon que la clave podía estar en los procesos nucleares exóticos implicados en la fusión de dos púlsares, una teoría que ahora ha sido confirmada.

Pese a los increíbles avances realizados en astronomía en los últimos dos siglos, puede que ahora tengamos más preguntas que entonces.

Consideremos la materia oscura. Hay pruebas de que hace más de veinte años afirmé que no tardaríamos en desvelar su naturaleza. Aunque esa predicción ha resultado errónea, aún no he perdido la esperanza. La energía oscura, sin embargo, es otro cantar. Este concepto apareció en 1998, cuando los investigadores que medían las distancias y velocidades de las supernovas descubrieron que la expansión del universo se estaba acelerando. Parece que una nueva y enigmática fuerza repulsiva asociada al

espacio vacío, bautizada como energía oscura, supera la atracción gravitatoria entre las galaxias y hace que se separen cada vez más rápido. Aún no hemos resuelto el misterio de esta componente (no sabemos cuál es su origen o por qué tiene la intensidad que tiene) y es probable que no lo logremos mientras no dispongamos de un modelo que dé cuenta de la estructura «granular» del espacio a escalas un trillón de veces más pequeñas que el núcleo atómico. Los físicos teóricos que trabajan en teoría de cuerdas o gravedad cuántica de bucles persiguen este reto, pero el fenómeno parece tan inaccesible a los experimentos que no espero respuestas en un futuro cercano. La parte positiva es que una teoría que explicase la energía contenida en el espacio vacío también podría arrojar luz sobre los instantes iniciales de nuestro universo, cuando todo estaba tan comprimido que las fluctuaciones cuánticas podían sacudir la totalidad del cosmos.

Eso nos lleva a otra de las grandes preguntas a las que nos enfrentamos: ¿cómo empezó todo? ¿Qué provocó la gran explosión con la que comenzó nuestro universo? ¿Pasó el espacio por una fase temprana de expansión extremadamente rápida, o inflación, como piensan muchos teóricos? Y aún hay más: algunos modelos, como la inflación eterna, indican que «nuestra» gran explosión podría no ser más que una isla de espaciotiempo dentro de un vasto archipiélago, una gran explosión entre muchas otras. Si esta hipótesis es correcta, cada gran explosión podría enfriarse de forma distinta y dar lugar a leyes físicas diferentes, con lo que tendríamos un multiverso en vez de un universo. Algunos investigadores detestan el concepto del multiverso, porque implica que nunca dispondremos de una explicación clara para las cantidades fundamentales que gobiernan nuestras leyes físicas: desde esta perspectiva más amplia, serían meros accidentes ambientales. Pero nuestras preferencias le traen sin cuidado a la naturaleza.

Hace unos diez años participé en una mesa redonda en la Universidad Stanford, y alguien de la audiencia nos preguntó cuánto apostaríamos a la idea del multiverso. Yo dije que, entre apostar mi pez de colores, mi perro o mi vida, estaría casi dispuesto a llegar al perro. Andrei Linde, que se ha pasado 25 años defendiendo la inflación eterna, aseguró que casi podría arriesgar su vida. Cuando alguien le refirió esta anécdota al físico Steven Weinberg, afirmó que se jugaría a mi perro y la vida de Linde sin ningún problema. Linde, mi perro y yo habremos muerto antes de que se dilucide la cuestión, pero nada de esto debe tacharse de metafísica: es ciencia especulativa, ciencia apasionante. Y podría ser cierta.

¿Y qué le ocurrirá a este universo (o multiverso) nuestro? Las predicciones a largo plazo son poco fiables, pero la opción más probable y conservadora es que nos aguarde casi una eternidad en un cosmos cada vez más frío y vacío. Las galaxias se alejarán más y más rápido, hasta acabar desapareciendo. Todo lo que quedará desde nuestro punto de vista serán los restos de la Vía Láctea, Andrómeda y otras pequeñas galaxias vecinas. Puede que se desintegren los protones, que se aniquilen las partículas de materia oscura, que haya destellos ocasionales al evaporarse un agujero negro... y luego, el silencio.

Ese posible futuro se basa en la idea de que la energía oscura permanece constante. Sin embargo, si disminuyera, podría ocurrir una «gran implosión», en la que el universo se contraería sobre sí mismo. Y si aumentara, se produciría un «gran desgarro» que desgajaría las galaxias, las estrellas e incluso los átomos.

Hay otras preguntas fascinantes que nos resultan más próximas. ¿Podría haber vida en alguno de los nuevos planetas que estamos descubriendo? Aquí todavía nos movemos en el terreno de las especulaciones. Pero, a no ser que el origen de la vida en la Tierra hubiera sido fruto de una tremenda casualidad, creo que encontraremos indicios de una biosfera en algún exoplaneta en los próximos 20 años. Aunque no me hago ilusiones con el descubrimiento de extraterrestres, creo que la búsqueda de vida inteligente es algo por lo que merece la pena apostar. Tener éxito en esta empresa traería el trascendental mensaje de que los conceptos de la lógica y la física no están limitados a la mente humana.

Hasta ahora, los avances en cosmología y astrofísica se han debido en un 95 por ciento a mejoras en los instrumentos y las técnicas, y en menos de un 5 por ciento a la teoría «de salón». Y pienso que ese balance se mantendrá. La máxima que escribió Hubble en la década de 1930 sigue siendo válida: «Mientras no se agoten los recursos empíricos, no necesitamos pasar a los fantasiosos dominios de la especulación».

Ha habido muchos períodos especialmente estimulantes en los últimos dos siglos: las décadas de 1920 y 1930, cuando nos dimos cuenta de que el universo no se limitaba a la Vía Láctea. O las de 1960 y 1970, en las que descubrimos objetos que desafían la física clásica, como las estrellas de neutrones y los cuásares, y pistas sobre el origen del tiempo en el fondo cósmico de microondas. Desde entonces, el ritmo de los avances ha ido aumentando más que ralentizándose.

Este increíble progreso pasará a la historia de la ciencia como uno de sus grandes triunfos, junto con la tectónica de placas, el genoma o el modelo estándar de la física de partículas. Y hay áreas importantes de la astronomía que no han hecho más que arrancar. El estudio de los exoplanetas solo tiene 25 años, y las investigaciones serias en astrobiología aún están en sus inicios. Algunos exoplanetas podrían albergar vida, y quizás hasta alienígenas que ya conozcan todas las respuestas. Y eso me resulta alentador.

PARA SABER MÁS

Historia de la cosmología. Helge Kragh. Crítica, 2008.
The realm of the nebulae. Edwin P. Hubble. Yale University Press, 2013.
Hasta el final del tiempo. Brian Greene. Crítica, 2020.

EN NUESTRO ARCHIVO

Exploración del universo. Martin Rees en *IyC*, enero de 2000.
¿El fin de la cosmología? Lawrence Krauss y Robert J. Scherrer en *IyC*, mayo de 2008.
¿Existe el multiverso? George F. R. Ellis en *IyC*, octubre de 2011.
Sombras de otros mundos. Joshua N. Winn en *IyC*, mayo de 2018.

GEOLOGÍA

LOS PEORES MOMENTOS *de la* TIERRA

LAS EXTINCIONES MASIVAS NOS ALERTAN SOBRE EL FUTURO DE LA VIDA EN NUESTRO PLANETA

Peter Brannen

Ilustración de Pascal Blanchet



Peter Brannen es periodista científico. En 2018-2019 disfrutó de una beca de periodismo ambiental en la Universidad de Colorado en Boulder. Es autor del libro *The ends of the world*, que trata sobre las cinco grandes extinciones masivas (Ecco, 2017).



Pangea, hace 252 millones de años: el mundo se acaba. En Siberia, las erupciones se suceden desde hace 300.000 años y no van a cesar. Y no se trata de un solo volcán, sino de toda Siberia (más de cinco millones de kilómetros cuadrados de ella), un desierto de dimensiones continentales que supura lava incandescente y vapor. Los mares que otrora resplandecían con corales rugosos y arrecifes de esponjas se han acidificado y están rebosantes de mercurio. Calientes como una sopa, burbujean y liberan un letal metano que alimenta repugnantes manchas de cieno agitadas por huracanes. El lecho marino se vacía a medida que los trilobites se extinguen, tras 250 millones de años de existencia.

Junto a ese océano pestilente, en las costas del supercontinente devastado, los bosques han desaparecido y ahora ocupan su lugar anchos ríos calientes de cauces trenzados que se derraman sobre la tierra inerte. Los hongos florecen allí donde los campos de helechos acogían combates llenos de colmillos y corazas, batallas entre gorgonópsidos y pareiasáuridos. Los cálidos vientos desgastan ahora sus huesos, blanqueados por una luz solar abrasadora que no atraviesa ningún filtro de ozono. Al caer la noche, unas extrañas constelaciones iluminan las olas muertas, que bañan las costas muertas y arrojan sobre ellas antiguos restos de arrecifes muertos procedentes de un mar sin vida. En el aire flota un olor nauseabundo. Solo hay ruinas, fango y calor. El océano se asfixia y las bacterias se extienden, formando estromatolitos. Cien mil soles salen y se ponen en un mundo sin esperanza. Cien mil primaveras se repiten sin descanso. Todo continúa estéril. Transcurren un millón de años de miseria. Diez millones.

Al fin, el planeta renace (esta vez con dinosaurios, ictiosaurios, pterosaurios, mamíferos, tortugas y esturiones), casi como si comenzara una historia completamente nueva, exuberante, optimista y vital: la era mesozoica. La vieja historia, demasiado aciaga para volver a contarla, quedó registrada en las profundidades de los enormes archivos de la Tierra, bajo un epitafio grabado en la roca con cincel geoquímico: «El dióxido de carbono destruyó este mundo».

Las extinciones masivas no son solo malos tiempos en la historia de la Tierra. Ni siquiera muy malos. Son los episodios más nefastos que han acaecido en los 500 millones de años de historia de la vida compleja. Se trata de apocalipsis globales, horribles y extremadamente infrecuentes que terminan con el linaje de la mayoría de las criaturas vivas del planeta. Son eventos terribles y surrealistas: 20.000 años de calor sofocante debido al efecto invernadero, salpicados de inviernos volcánicos o tardes de terror celestial y tsunamis. Y hasta alrededor de 1980, se consideraban meras especulaciones indecorosas.

En los dos últimos siglos, el campo de la geología se ha caracterizado (al igual que el propio registro fósil) por largos períodos de estabilidad interrumpidos por emocionantes momentos de agitación e innovación. Aunque sería arbitrario señalar a un único fundador de la geología moderna, es preciso destacar la labor del geólogo escocés James Hutton, quien contribuyó sobremanera a desvelar el «abismo del tiempo» que se extiende bajo nuestros pies. En 1788, en Siccar Point (un promontorio salpica-

EN SÍNTESIS

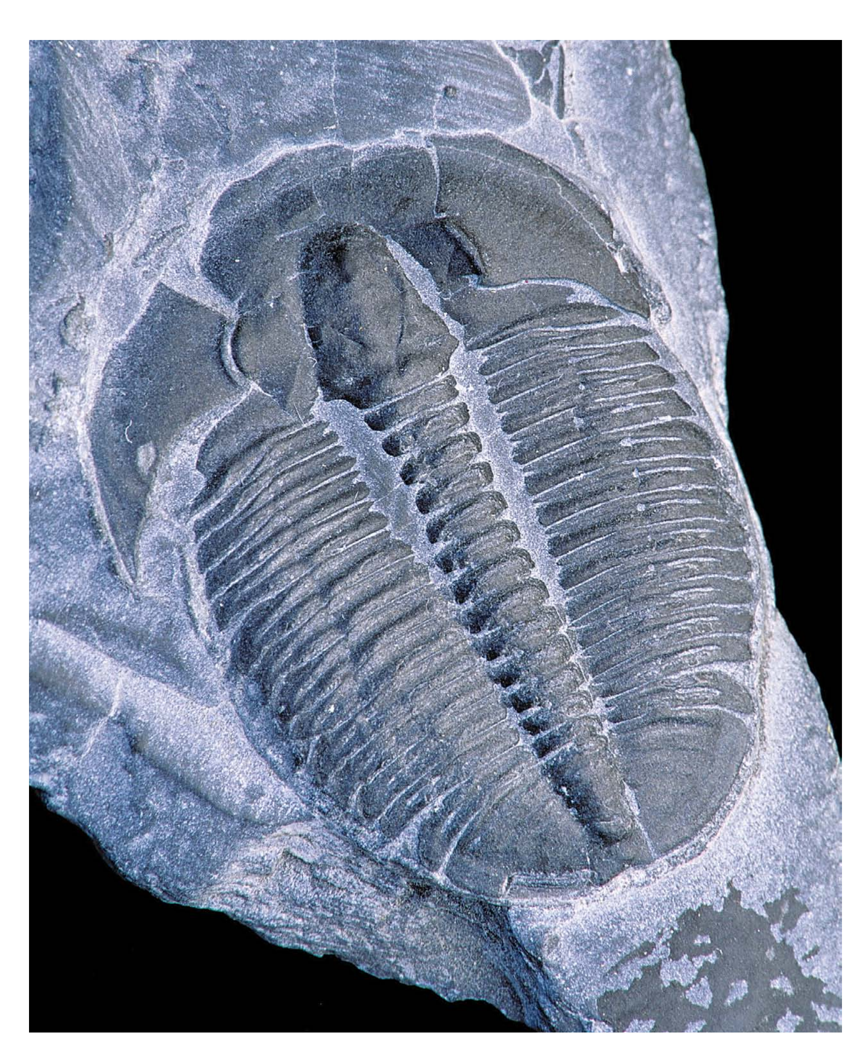
Las extinciones masivas son apocalipsis globales donde perecen gran parte de las especies del planeta. Pero pocos creían en ellas hasta 1980, cuando se hallaron indicios del asteroide que acabó con los dinosaurios.

Sin embargo, no todas las extinciones masivas tuvieron que ver con impactos. La mayor amenaza para la vida ha sido la propia Tierra, y el arma más eficaz, el dióxido de carbono.

Los niveles de CO_2 y la pérdida de biodiversidad actuales suponen una advertencia: debemos tomar medidas para no avanzar por el mismo camino que condujo a las peores tragedias de la historia terrestre.

do de sal situado en la costa este de Escocia), Hutton divisó un afloramiento compuesto por dos formaciones rocosas, dispuestas una encima de la otra, que se encontraban de manera abrupta en el medio. Sin embargo, los estratos inferiores (láminas de lodo procedente de aguas profundas) se habían formado en el fondo oceánico y posteriormente se habían inclinado, elevado y alisado por la acción del viento y la erosión, mientras que los estratos superiores se habían constituido en tierra firme, en un ambiente fluvial tropical. La idea del tiempo desaparecido entre ambas formaciones, ahora adyacentes pero separadas por una brecha insondable, abrumaba a Hutton. La mayoría de sus escritos son impenetrables y nada extraordinarios; parece como si hubiera reservado toda su elocuencia para hacer una inquietante observación: en la confusión reinante en la Tierra que pisamos, «no hallamos vestigios de un inicio, ni perspectivas de un final». Resulta que el tiempo es «profundo», aunque hasta ahora la historia de la humanidad se haya desarrollado en la superficie.

Los geólogos abandonaron las restricciones impuestas por el tiempo bíblico y el diluvio de Noé, y su nueva ciencia maduró con el paso de los decenios, espoleada por las cuantiosas recompensas materiales que reportaba el hallazgo de carbón y minerales en una extraña nueva era industrial. La historia de la vida en nuestro planeta, aun fragmentada e inaccesible, se fue revelando poco a poco.



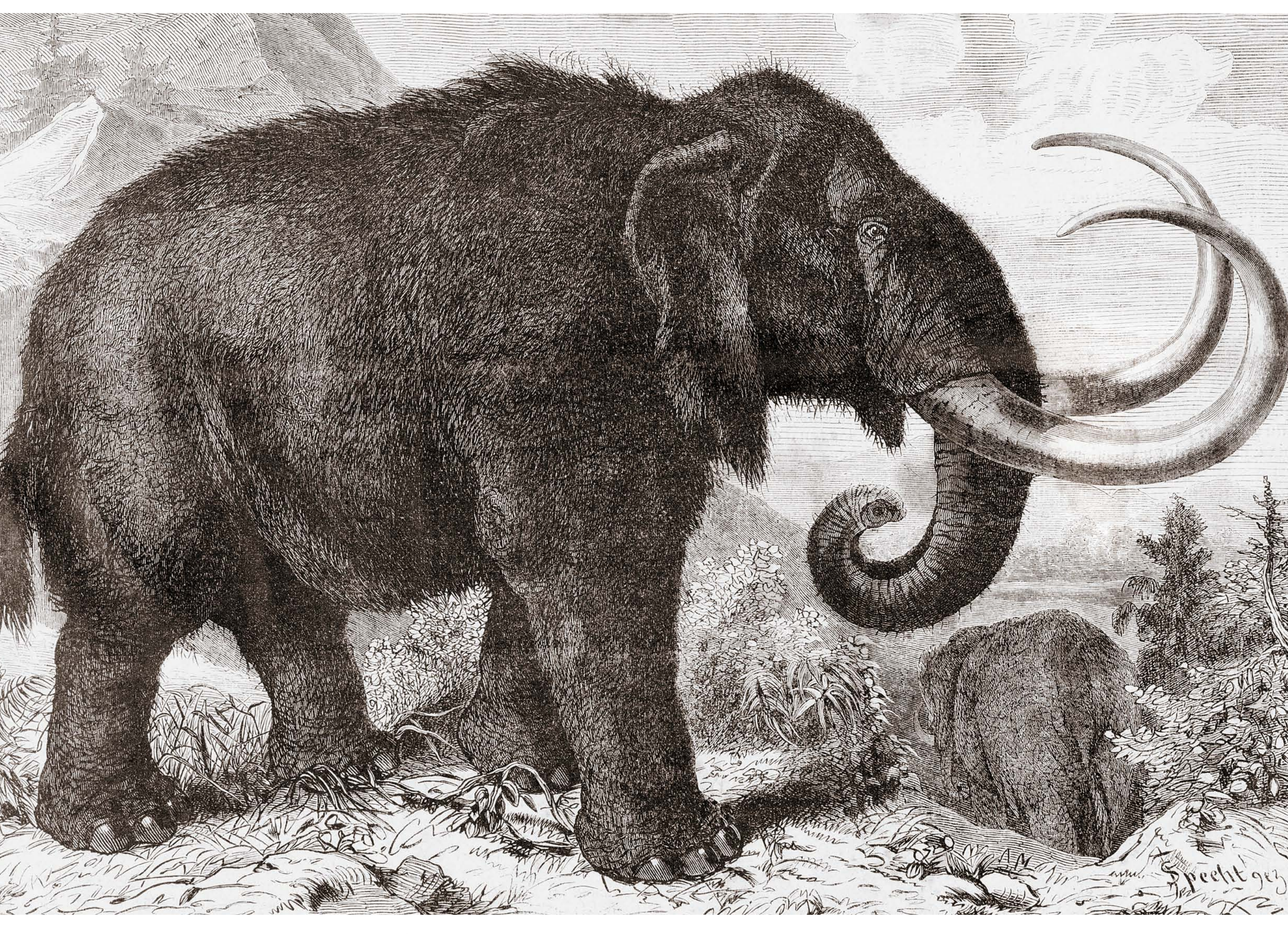
LOS TRILOBITES poblaron los mares durante 250 millones de años antes de ser aniquilados en la peor extinción masiva de la historia terrestre.

ED RESCHKE, GETTY IMAGES

A mediados del siglo XIX, la disciplina se hallaba en su adolescencia, todavía dominada por hombres acomodados, los clásicos diletantes con corbata retratados con gravedad en óleos y litografías. Las contribuciones de mujeres como Mary Anning, la inigualable cazadora de fósiles que recorrió la costa Jurásica inglesa desenterrando «piedras de serpiente» (amonites) y «cocodrilos de piedra», no lograron más que un tímido reconocimiento. Aunque los titulares de aquella época dejan traslucir una realidad científica un tanto rudimentaria («Los expertos dudan de que el Sol realmente queme carbón», destacaba *Scientific American* en 1863), la geología se había establecido como un campo del saber empírico y sistematizado, con raíces en la antigüedad: uno de los numerosos remolinos intelectuales que surgieron de la filosofía natural de la Ilustración. En otras palabras, había adquirido unas reglas, en apariencia sencillas pero de gran calado: las capas de roca oceánica que vemos inclinadas con ángulos inusuales en tierra firme tuvieron que reposar en horizontal sobre el lecho marino en una época lejana; los diques magmáticos que atraviesan la secuencia rocosa debieron inyectarse un tiempo después; y el contenido fósil de los estratos puede relacionarse con el de otras rocas distantes pertenecientes a los mismos estratos.

En 1860, el geólogo inglés John Phillips se sirvió del trabajo de recolección de fósiles realizado en las décadas anteriores, así como del creciente volumen de publicaciones paleontológicas que aparecían diseminadas en elegantes monografías, para dibujar una curva (sorprendentemente moderna) que representaba la abundancia de seres vivos a lo largo de la historia de la Tierra. En su gráfico, el primero de ese tipo, la vida mostraba dos preocupantes y profundos declives: uno que separaba la era paleozoica, repleta de trilobites, de la mesozoica, dominada por los dinosaurios; y otra caída localizada entre el Mesozoico y nuestro propio período cenozoico (todos ellos, términos inventados por Phillips). Esas drásticas interrupciones en el registro fósil indicaban que algún tipo de calamidad ancestral dividía las grandes eras y respaldaban la idea blasfema de que una especie (es decir, la mismísima creación de Dios) podía extinguirse, una hipótesis que ya había planteado medio siglo antes el naturalista francés Georges Cuvier. Al considerar los extraños huesos de elefante hallados en el Nuevo Mundo, pertenecientes a mamuts y mastodontes (el «animal de Ohio»), Cuvier propuso que la vida en la Tierra podía desaparecer en «revoluciones», igual que los Gobiernos franceses. El gráfico de Phillips ofreció algo similar a una prueba cuantitativa, y el propio científico inglés pensaba que cada recuperación respondía a un acto puntual de creación divina. No obstante, tendría que pasar más de un siglo para que alguien volviera a tomarse en serio la idea de las extinciones masivas.

La razón es que, a finales del siglo XIX, el campo aún estaba dominado por el longevo paradigma del «uniformismo» (y se-



REPRESENTACIÓN DE 1867 de un mamut lanudo, cuyos huesos llevaron a Georges Cuvier a proponer que la vida podía extinguirse en «revoluciones».

guiría estándolo durante decenios). Este concepto, popularizado por Charles Lyell, se resume en una frase que todavía se enseña en las facultades de geología: «El presente es la clave del pasado». Es decir, que los lentos procesos que operan actualmente en la superficie terrestre (la implacable acción de la lluvia sobre la roca, la inexorable incisión de los ríos en las tierras altas o la continua acumulación de arena en las dunas del desierto) siempre han modelado el planeta de la misma manera tediosa y podrían explicar todo lo que observamos en el registro geológico [*véase* «Las leyes de Lyell, a examen», por Michael R. Rampino; Investigación y Ciencia, octubre de 2018]. Dibujando en ese nuevo y vasto lienzo del tiempo, Charles Darwin propuso que unos cambios biológicos igualmente pequeños pero constantes a lo largo de generaciones, filtrados por el incesante combate entre la vida y la muerte, y con los eones de Hutton a su disposición para ramificarse, podrían dar lugar a esa «infinidad de formas» de vida «cada vez más bellas» que pueblan hoy la Tierra. Los inapropiados cataclismos de Cuvier y Phillips estaban deliberadamente ausentes en esta versión mesurada de la historia planetaria.

A mediados del siglo xx, la tectónica de placas (la validación de la hipótesis, una vez marginal, de que los continentes se desplazan por el planeta como navíos a la deriva) revolucionó la geología. Aun así, la idea de que pudieran haberse producido repentinas extinciones masivas a escala global seguía suscitando, cuando menos, muchas dudas. El catastrofismo se veía como una noción fantasmagórica, reminiscente de un ignorante mundo precientífico donde unos dioses caprichosos sometían al planeta a actos purificadores de destrucción global. Peor aún, las especulaciones sobre las causas de la desaparición de los dinosaurios se habían convertido en una especie de industria artesanal en manos de un grupo de fanáticos, y a los científicos serios les preocupaba asociarse con un colectivo que proponía teorías tan descabelladas como que los dinosaurios tenían un «cerebro menguante que desembocó en la estupidez», desarrollaron cabezas «demasiado pesadas para levantarlas», tuvieron que «competir con las orugas» o padecieron «impulsos psicóticos suicidas», «fiebre del heno letal» o «envenenamiento por metano debido a sus propias flatulencias». Con todo, la ortodoxia comenzaba a resquebrajarse.

ALAMY

¿Neocatastrofismo?, preguntaba el iconoclasta científico alemán Otto Schindewolf a sus compañeros paleontólogos en un artículo de 1962, en un intento por retomar el catastrofismo de Cuvier en el siglo xx. Dado que formuló su pregunta en alemán, pocos científicos de habla inglesa sintieron la necesidad de responder. Pero Schindewolf no podía obviar la inquietante interrupción de la vida que había observado, por ejemplo, en la cordillera de la Sal, en Pakistán: sus antiguas rocas parecían reflejar un terrible colapso global del ecosistema oceánico a finales del período pérmico, hace 250 millones de años (de hecho, esa fue la mayor extinción masiva de la historia terrestre), tal y como Phillips había plasmado en su gráfico hacía más de un siglo. En su versión del apocalipsis, Schindewolf recurrió a una supernova, cuyas radiaciones habrían alcanzado la Tierra y llenado la biosfera de mutaciones desastrosas.

Ese mismo año, el estadounidense Norman Newell representó en un gráfico la evolución de 2500 familias de animales a lo largo de la historia del planeta y observó seis intervalos en los que una extinción parecía haber acabado con gran parte de la vida. En su caso, achacó esas fatalidades a cambios drásticos en el nivel del mar. Y a finales de esa década, Digby McLaren, director del Instituto de Sedimentología y Geología del Petróleo del Servicio de Inspección Geológica de Canadá, en su discurso presidencial de 1969 ante la Sociedad Paleontológica de EE.UU., insistió en que sus compañeros paleontólogos estaban intentando eliminar interrupciones obvias del registro fósil; por ejemplo, la devastación que, 375 millones de años atrás, acabó con el mayor sistema global de arrecifes que ha habido nunca. «No puedo aceptar una explicación uniformista», aseveró en referencia a esa catástrofe, evidenciada en multitud de rocas antiguas desde Irán hasta Alberta. Y McLaren tenía una idea sobre qué podía haber causado tal discontinuidad.

«Por lo tanto, haré que caiga un meteorito grande, o muy grande, en el Pacífico del Paleozoico», anunció, capaz de generar «una ola de seis kilómetros de altura. Con eso bastará». Parece que el discurso de McLaren fue «recibido con un silencio embarazoso», y muchos de los paleontólogos presentes, aún bajo el hechizo de Lyell, supusieron que estaba de broma.

Pero, en 1980, un asteroide iba a aterrizar en la disciplina. Walter Álvarez, por entonces un joven profesor de la Universidad de California en Berkeley, realizó una caminata en los Apeninos, sobre la población medieval de Gubbio. En aquella pila montañosa de antiguas calizas marinas, levantada por el progresivo avance de África hacia Europa, se observaba una brusca ruptura (un estrato de arcilla sin restos de vida) entre la plácida vida marina de la época de los dinosaurios y las escasas formas de vida del inicio de la era de los mamíferos. Tal vez la transformación se había producido a lo largo de millones de años, lo que validaría la teoría uniformista. O tal vez Cuvier y Phillips estaban en lo cierto, y el cambio fue brusco y devastador. Movido por la curiosidad, Álvarez acudió a su padre (Luis, nóbel de física) para que le ayudara a abordar la cuestión. Era una especie de segundo acto para el mayor de los Álvarez, que había sido uno de los pioneros de los sistemas militares de radar, había colaborado en el desarrollo de la bomba atómica en el marco del proyecto Manhattan e incluso había visto explotar la «Little Boy» sobre Hiroshima desde un avión B-29. Sorprendentemente, su trabajo en tiempos de guerra resultó relevante a la hora de investigar la catástrofe que había estrangulado el planeta unos 66 millones de años atrás.

Los Álvarez sabían que algunos elementos poco comunes, como el iridio, llegaban desde el espacio a ritmo constante, en una eterna llovizna de polvo cósmico [*véase* «El impacto de un cuerpo extraterrestre», por Walter Álvarez y Frank Asaro; Investigación y Ciencia, diciembre de 1990]. Si la funesta capa de arcilla contenía poco iridio, razonaron, la drástica renovación de la vida se habría producido en un breve período de tiempo. Por el contrario, si encontraban mucho iridio, el cambio habría sido mucho más lento. Pero ¿y si, como sucedió, hallaban 100 veces más iridio del esperado? Tras analizar las muestras de arcilla bombardeándolas con neutrones en un reactor nuclear, los Álvarez se quedaron atónitos. Tal cantidad de material exótico no podía haber llegado por medio de una leve llovizna de polvo cósmico: el único vehículo capaz de transportarla era una roca espacial de dimensiones colosales. (Mucha gente, aunque no los propios Álvarez, omite que los geólogos Jan Smit y Jan Hertogen llegaron independientemente a la misma conclusión al estudiar antiguas rocas oceánicas en España, e incluso publicaron sus resultados en *Nature* dos semanas antes de que el histórico artículo de los Álvarez apareciera en *Science*).

Durante decenios, la idea de que hubieran podido producirse extinciones masivas repentinas a escala global suscitó, cuando menos, muchas dudas

El impacto de esa roca habría producido un caos similar al de una encarnizada guerra nuclear, solo que aún peor. Por un lado estaría el inimaginable calor de la explosión inicial, que habría sido miles de veces más intensa que la detonación simultánea y en un mismo lugar de todas las armas nucleares que existían en la Tierra durante el apogeo de la Guerra Fría. Como me explicó un experto en modelización de impactos, la colisión «sin duda habría bastado para lanzar una montaña al espacio a la velocidad de escape». Se ha propuesto que ese material eyectado que iba rodeando el planeta podría haber convertido la atmósfera en un horno (en el que se habrían cocido los dinosaurios) durante unos 20 minutos. El subsiguiente invierno nuclear habría traído décadas de frío y oscuridad, privando de alimento a cualquier criatura que hubiera tenido la suerte de no ser fulminada por el asteroide, arrastrada por los tsunamis o carbonizada por la reentrada balística de los escombros en la atmósfera.

Cualquier sombra de duda que pudiera subsistir entre los uniformistas más intransigentes se disipó en 1991, al descubrirse un cráter de unos 180 kilómetros de diámetro enterrado bajo decenas de millones de años de roca caliza en la península de Yucatán, en México. De hecho, los geofísicos que trabajaban para la petrolera nacional mexicana Pemex ya habían descubierto el cráter en 1978, pero anunciaron su hallazgo en un congreso de geofísica que pasó desapercibido para los paleontólogos durante más de una década. Y los mayas ya habían hallado la estructura unos 1000 años antes, cuando construyeron sus asentamientos



AFLORAMIENTO EN COLORADO de una capa correspondiente al límite K/Pg, que marca la extinción masiva que puso fin al reinado de los dinosaurios.

alrededor de las dolinas calcáreas que salpican el Yucatán y que les proporcionaban agua dulce. La distribución de esas dolinas refleja la presencia de rocas tremendamente alteradas a más profundidad y se corresponde casi a la perfección con el borde del cráter.

La cultura popular tomó buena nota. En la década de los noventa se produjo una avalancha de películas con efectos especiales chapuceros y programas de televisión en torno al impacto, que (junto con la espectacular colisión del cometa Shoemaker-Levy 9 contra Júpiter en 1994, un choque de dimensiones apocalípticas) bastaron para convencer al público del peligro asociado a las rocas espaciales [*véase* «El encuentro del cometa Shoemaker-Levy 9 con Júpiter», por David H. Levy, Eugene M. Shoemaker y Carolyn S. Shoemaker; Investigación y Ciencia, octubre de 1995]. Y normalmente aquí es donde acaba la historia: la mayoría de la gente piensa que una extinción masiva es lo que ocurre cuando cae del cielo un objeto gigantesco.

Durante las tres décadas siguientes, los geólogos recorrieron el mundo en busca de pruebas convincentes de impactos (capas de iridio, cuarzo de impacto o cráteres gigantes) en los límites rocosos que marcan las otras cuatro grandes extinciones masivas de la historia de la Tierra. Pero ocurrió algo sorprendente: no hallaron ninguna. Y eso que tres de esas cuatro extinciones habían sido todavía más dramáticas que la catástrofe que acabó con los dinosaurios no avianos.

De hecho, incluso se han observado grandes estructuras de impacto que no parecen haber tenido demasiadas consecuencias para la vida, como el cráter Manicouagan en Quebec (una depresión de 100 kilómetros de diámetro generada durante el Triásico, hoy convertida en un sistema circular de lagos en medio de un paraíso boreal de moscas negras) o el enorme cráter que creó la bahía de Chesapeake hace 36 millones de años. Eso constituyó una sorpresa, dada la notable correlación entre el impacto de Yucatán y la desaparición de los grandes saurios (y de gran parte del resto de seres vivos) a finales del período cretácico.

Y lo que resultaba aún más extraño: el impresionante final de la era de los dinosaurios no solo coincidió con la llegada de un visitante del espacio exterior, sino también con uno de los mayores eventos volcánicos en la historia de la vida animal: una serie de erupciones que sepultaron gran parte de la India bajo kilómetros de lava. Si bien existe consenso en cuanto a que el agente más destructivo fue el asteroide, se trataba del mismo tipo de erupciones capaces de cambiar el mundo que habían causado no solo decenas de extinciones menores y desventuras climáticas, sino también varias de las otras grandes extinciones masivas, incluida la peor de todas, acaecida hace 252 millones de años, a finales del Pérmico.

En las últimas décadas ha emergido una visión más sutil de las extinciones masivas. Los geólogos disponen hoy de potentes técnicas con las que Hutton no podría ni haber soñado: tienen acceso a afloramientos remotos de todo el mundo o a archivos de lodo extraído del fondo oceánico con buques perforadores, y desvelan secretos estudiando antiguas conchas marinas con espectrómetros de masas, datando fragmentos desgastados de granito mediante geocronología de radioisótopos o analizando bases de datos fósiles y geoquímicos con redes neuronales que se apoyan en una increíble capacidad de procesamiento. Y en los últimos años, este ambicioso esfuerzo por tratar de entender la historia terrestre les ha llevado a descubrir un conjunto de amenazas existenciales mucho más íntimas que la muerte sobrevenida desde el espacio. Resulta que el principal asesino en masa de la vida terrestre es la propia Tierra. Y el arma homicida más fiable es el dióxido de carbono.

Ciento treinta y cinco millones de años antes de que un pedazo de basura espacial extraviado interceptara la órbita terrestre y arrasara un mundo de dinosaurios perfectamente organizado, el planeta sufrió otra extinción masiva aún más terrible. En ella quedó devastado un orbe de extraños cocodrilos, anfibios gigantes, corales pétreos e infinidad de criaturas raras pero impresionantes parecidas a anguilas, así como el 80 por ciento del resto de la vida compleja del planeta. El supercontinente Pangea se fue separando a lo largo de sus costuras, estirándose como un chicle, y eso abrió una herida por la que brotó lava incandescente (en distintos episodios ocurridos a lo largo de 600.000 años) hasta cubrir una extensión de casi ocho millones de kilómetros. Aunque las erupciones seguramente causaron todo tipo de desastres, quizá lo más relevante es que expulsaron miles de gigatoneladas de dióxido de carbono a la atmósfera, y los océanos también sufrieron una sobredosis del gas volcánico. El agua del mar se acidificó por una mera cuestión química, mientras que la temperatura del planeta se disparó por una mera cuestión física: así actúa el CO_2. Los acantilados Palisades de Nueva Jersey, que bordean

JULIE MOWBRAY, ALAMY

el río Hudson desde la ciudad de Nueva York, son los restos de los conductos volcánicos implicados en esas erupciones titánicas de finales del Triásico, y están hechos de un magma antiguo que se corresponde con la roca volcánica del mismo tipo y la misma edad observada en lugares tan distantes como Marruecos, Brasil, Nueva Escocia y España.

Cientos de millones de años antes, las dos primeras grandes extinciones masivas habían destruido planetas que nos resultarían irreconocibles, con continentes deformados separados por océanos ignotos. En los mares de esos mundos extraños pulularon cefalópodos gigantes y después unos peces aún más grandes, con fauces similares a guillotinas y cascos óseos protectores. En nuestro planeta se produce un incesante intercambio de carbono (el componente esencial de la vida) entre las rocas, el aire, el agua y los seres vivos, cuyo equilibrio sirve para mantener un clima habitable y una química oceánica acogedora. Sin embargo, en aquellos mundos arcaicos, ese ciclo del carbono sufrió una perturbación repentina, causada por episodios de absorción de CO_2 asociados a la formación de montañas tropicales, la meteorización acelerada de las rocas y el nuevo proyecto de geoingeniería global emprendido por las plantas terrestres. Se trata de mecanismos letales algo más intrincados y ciertamente menos espectaculares que el impacto de un asteroide, pero funcionaron: esos mundos pasados se descontrolaron y empezaron a congelarse y abrasarse alternativamente, mientras la Tierra luchaba por recobrar la calma y recomponer un ciclo global del carbono que se había desbocado.

Pero fue hace 252 millones de años, en aquel planeta olvidado con el que hemos iniciado nuestro periplo por los apocalipsis del pasado (ese mundo blanqueado por el Sol y con océanos prácticamente inertes), cuando la historia de la vida en la Tierra estuvo a punto de terminar de forma prematura. Se trataba de Pangea, un mundo anterior a los dinosaurios, los mamíferos o las flores; pero un mundo rico, con coníferas, ágiles depredadores vagamente reminiscentes de los leones y presas reptilianas torpes y verrugosas. Y de repente, ese mundo se acabó. Terminó con una riada de roca incandescente a escala continental, breves inviernos volcánicos como consecuencia de las erupciones y nubes de diversos gases volcánicos, muchos de los cuales estarían prohibidos en el campo de batalla, como el cloro gaseoso o el mercurio.

A medida que el magma incineraba vetas subterráneas de sal y yeso, las emanaciones de halocarburos arrasaron la capa de ozono, como evidencian las mutaciones que apreciamos en algunos fósiles de plantas. Pero la mayor extinción masiva de la historia terrestre no alcanzó su terrible clímax hasta que el magma que alimentaba esas erupciones se encontró con enormes depósitos subterráneos de gas natural, carbón y rocas con alto contenido en carbono. En ese momento se produjeron grandes explosiones que liberaron decenas de miles de gigatoneladas de metano y dióxido de carbono. Las temperaturas subieron unos 12 grados Celsius. Y los océanos, donde la anoxia y la acidificación acabaron con el 96 por ciento de las especies, estaban tan calientes como unas termas. Entonces, el silencio cayó sobre el registro fósil.

A comienzos de la Revolución Industrial, exhumamos bosques de carbono que llevaban largo tiempo adormecidos en la Tierra antigua para usarlos en los hornos de la modernidad. Sabemos que ese fuego artificial no puede arder para siempre sin traer la miseria a nuestro mundo. La concentración actual de dióxido de carbono, de 416 partes por millón, es la más alta de los últimos millones de años y hasta podría estar aumentando más deprisa que en las mayores calamidades de todos los tiempos. Mientras tanto, siglos o incluso milenios de caza, deforestación y contaminación han empobrecido el mundo natural. Según un cálculo, si seguimos haciendo que las especies se extingan al ritmo actual, podríamos alcanzar el mismo grado de devastación biológica que causaron esas imponentes extinciones masivas del pasado remoto en un plazo de entre 300 y 12.000 años [*véase* «La extinción de las especies», por W. Wayt Gibbs; Investigación y Ciencia, enero de 2002]. Puede parecer mucho tiempo, pero desde el punto de vista geológico es apenas un instante. Y lo más preocupante es que podrían existir umbrales ecológicos desconocidos, más allá de los cuales la biosfera no solo sufriría los efectos del desgaste, sino que colapsaría de manera repentina como resultado de una serie de fallos en cascada. En otras palabras, podría ser que hubiera puntos de inflexión... puntos sin retorno.

Sabemos qué tenemos que hacer para evitar ingresar en el infausto panteón de los peores eventos ocurridos en la historia de la Tierra. Debemos preservar zonas del planeta (en forma de áreas marinas protegidas, reservas naturales y corredores migratorios) para permitir que la biosfera se recupere del golpe que ya le hemos asestado. Y dejar de extraer restos de vida antigua de las profundidades de la corteza terrestre para prenderles fuego en la superficie. Mientras la humanidad acciona los mismos mecanismos que desencadenaron las peores tragedias de la historia de nuestro planeta, debemos consultar el pasado y escuchar los consejos de los mundos rotos de antaño. IyC

PARA SABER MÁS

Mass extinctions and their aftermath. Anthony Hallam y Paul B. Wignall. Oxford University Press, 1997.
***T. rex* and the crater of doom.** Walter Álvarez. Princeton University Press, 1997.
Has the Earth's sixth mass extinction already arrived? Anthony D. Barnosky et al. en *Nature*, vol. 471, págs. 51–57, marzo de 2011.
Extinction: How life on earth nearly ended 250 million years ago. Douglas H. Erwin. Princeton University Press, 2015.

EN NUESTRO ARCHIVO

La mayor extinción biológica conocida. Douglas H. Erwin en *IyC*, septiembre de 1996.
¿Qué causó la extinción de los dinosaurios? Stephen Brusatte en *IyC*, febrero de 2016.
Erupciones volcánicas y extinciones masivas. Howard Lee en *IyC*, agosto de 2016.



EVOLUCIÓN

EL ROMPECABEZAS *del* ORIGEN HUMANO

LOS ÚLTIMOS DESCUBRIMIENTOS PALEONTOLÓGICOS Y GENÉTICOS HABRÍAN ENTUSIASMADO A DARWIN, PUES SACAN A RELUCIR LA GRAN COMPLEJIDAD DE NUESTRA EVOLUCIÓN

Kate Wong

Ilustración de Pascal Blanchet

Kate Wong es editora sénior en *Scientific American* para las áreas de evolución y ecología.



Charles Darwin publicó en 1859 el libro científico más importante de la historia. *El origen de las especies* revolucionó la forma en que la sociedad entendía la naturaleza. En desafío al dogma victoriano, afirmó que las especies vivientes no eran inmutables ni una creación divina. A su juicio, la magnífica variedad de la vida debía ser el resultado de las modificaciones generadas en la descendencia de un antepasado común por la acción de la selección natural. Pero a pesar de su brillante explicación sobre la génesis de especies tan diversas como las hormigas y los armadillos, los murciélagos y los percebes, curiosamente una quedó al margen de todo argumento en su gran obra: la suya propia. Solo en la penúltima página alude con suma brevedad a *Homo sapiens*, señalando tímidamente que «se proyectará mucha luz sobre el origen del hombre y sobre su historia». Nada más. Eso fue todo lo que escribió acerca del nacimiento de la especie más importante del planeta.

No era porque pensara que el ser humano quedaba al margen de la evolución. Doce años después vería la luz otra obra suya acerca de la cuestión: *El origen del hombre*. En ella argumentaba que haber incluido el género humano en su anterior libro solo habría servido para que los lectores se alzasen contra su revolucionaria idea. Pero ni siquiera en ella pudo concretar gran cosa sobre el origen de la humanidad, pues los únicos datos de que dispuso sobre nuestra evolución provenían de la anatomía comparada, la embriología y el comportamiento, como en las demás especies. El problema residía en que por aquel entonces apenas se conocían fósiles que aportasen indicios del pasado de la humanidad. «Lo único que sabías era aquello que podías deducir», explica el paleoantropólogo Bernard Wood, de la Universidad George Washington.

Es digno de mérito que Darwin hiciese observaciones y predicciones tan acertadas sobre nuestra especie y nuestro pasado con la escasa información que tuvo a su alcance. Argumentó que todos los seres humanos pertenecían a una misma especie y que todas las «razas» eran descendientes de un único linaje ancestral. Además, señalando las similitudes anatómicas entre el ser humano y los simios africanos, concluyó que el chimpancé y el gorila eran nuestros parientes vivos más próximos. Y, dado ese parentesco, supuso que nuestros primeros antepasados probablemente vivieron en África.

Desde entonces, «las pruebas han salido paulatinamente a la luz», añade Wood. Durante este siglo y medio la ciencia ha confirmado la predicción de Darwin y ha elaborado un relato prolijo de nuestros orígenes. Los paleoantropólogos han recuperado fósiles de homininos (el grupo al que pertenece *H. sapiens* y sus parientes extintos) que abarcan los últimos siete millones años. Este extraordinario registro fósil muestra que, en efecto, los homininos surgieron en África a partir de primates cuadrúpedos que acabaron por convertirse en criaturas bípedas, dotadas de unas manos hábiles y un cerebro grande.

El registro arqueológico abarca cerca de la mitad de ese lapso y nos brinda datos sobre los progresos culturales de esa evolución: desde las primeras tentativas con rudimentarias herramientas de piedra hasta la invención de símbolos, canciones y

EN SÍNTESIS

Darwin supuso que la cuna de la humanidad debía estar en África, pero tuvo que pasar un siglo antes de que los hallazgos paleontológicos le dieran la razón y la idea fuese aceptada sin prejuicios.

Lejos de ser un proceso lineal, la evolución humana demuestra ser compleja y tortuosa. El árbol de los homínidos posee multitud de ramas, algunas incompletas y otras aún desconocidas.

El novedoso estudio del ADN fósil está desvelando que la hibridación ha sido común en el género *Homo*. El genoma de *H. sapiens* conserva vestigios de otras especies afines, hoy extintas, con las que nuestros ancestros se cruzaron en la prehistoria.

relatos. También nos indica el proceso de dispersión planetaria de nuestros ancestros. Otro aspecto que muestran los fósiles y los útiles es que la coexistencia de especies ha sido la norma durante gran parte del periplo de los homininos. Los estudios de ADN actual y fósil han aportado datos sorprendentes sobre lo ocurrido a raíz de los encuentros.

Ahora sabemos que la saga humana es mucho más enrevesada de lo que supusieron los eruditos decimonónicos. Las sencillas explicaciones acerca de nuestra prehistoria se han derrumbado bajo el peso de las pruebas: no hay un único eslabón perdido que vincule los simios con el hombre, ni una sola línea evolutiva que conduzca a una meta predestinada. Nuestra historia es compleja, desordenada y azarosa. Aún así, lejos de socavar la teoría darwinista, le confiere más solidez.

No quiere decir lo anterior que todo esté resuelto. Quedan muchas preguntas sin respuesta. Pero nuestro origen ha pasado de ser una especulación incómoda en tiempos de Darwin a convertirse en uno de los ejemplos mejor estudiados del poder transformador de la evolución.

El ser humano es una criatura extraña que camina erguida sobre sus piernas, posee un cerebro voluminoso, idea útiles para satisfacer sus necesidades, se expresa por medio de símbolos y ha conquistado los confines del planeta. Hace siglos que los científicos intentan explicar cómo hemos llegado a ser lo que somos y qué lugar ocupamos en el mundo natural.

A menudo, las ideologías racistas han distorsionado la investigación. Si pudiéramos remontarnos a los años que preceden al impacto de la teoría darwinista, en la década de 1830, cuando un joven Darwin navegaba a bordo del *Beagle* en su trascendental viaje, presenciaríamos el surgimiento de un movimiento que promovía la idea de que los grupos humanos del planeta (las razas) tenían orígenes distintos. Para promover esta teoría, denominada poligenismo, algunos científicos como Samuel Morton, de Filadelfia, recogían cráneos de diferentes partes del mundo y analizaban sus dimensiones y su morfología, en la falsa creencia de que tales atributos eran indicadores de la inteligencia. Cuando clasificaban los especímenes, los europeos aparecían oportunamente en la cúspide y los africanos en la base. «Había el deseo de dotar de fundamento científico a las estructuras políticas y de poder» explica la antropóloga y genetista Jennifer Raff, de la Universidad de Kansas. «Era una ciencia al servicio de la esclavitud y del colonialismo.»

Darwin era contrario a esa idea y abogaba por el monogenismo, teoría que defiende que todos los humanos compartimos el mismo antepasado, pero le coaccionaron para que apoyase la superioridad racial. El darwinismo social resultó ser una mala aplicación a la sociedad humana de su teoría sobre la lucha por la existencia a través de la selección natural, que ofreció una argumentación seudocientífica a la injusticia social y la opresión. Él mismo no compartía semejante punto de vista. De hecho, según sus biógrafos Adrian Desmond y James Moore, el rechazo a la esclavitud pudo ser uno de los motores de sus investigaciones.

Cuando *El origen del Hombre* se publicó en 1871, la idea de que la humanidad había evolucionado a partir de un ancestro común con los simios ya estaba ganando terreno en los círculos científicos, gracias a las obras publicadas en la década anterior por el biólogo inglés Thomas Henry Huxley y el geólogo escocés Charles Lyell. Sin embargo, las pruebas paleontológicas eran escasas. Los únicos fósiles de homininos conocidos eran un puñado de restos, de pocas decenas de miles de años de antigüedad, que se habían recuperado en yacimientos de Europa. Algunos pertenecían a *H. sapiens*, mientras que otros acabarían siendo reconocidos como pertenecientes a una especie afín, *H. neanderthalensis*. Los restos de nuestros ancestros simiescos más remotos debían yacer, pues, en algún rincón del mundo, esperando a ser desenterrados. La sugerencia de Darwin, y antes que él la de Huxley, de que debían hallarse en África, topó con las reticencias de los estudiosos, que veían en Asia una cuna más civilizada para la humanidad y remarcaban las semejanzas entre el hombre y los gibones de ese continente.

Quizá por eso no debiera sorprendernos que el primer fósil descubierto de hominino, mucho más antiguo y primitivo que los europeos, no viniera de África sino de Asia. En 1891, el anatomista holandés Eugène Dubois descubrió unos restos en la isla indonesia de Java que atribuyó al ansiado eslabón perdido entre los simios y el hombre. El hallazgo, que Dubois llamó *Pithecanthropus erectus,* fomentó los esfuerzos por enraizar a la humanidad en Asia. Hoy sabemos que el fósil tiene entre 700.000 y un millón de años y que perteneció a *Homo erectus*, un hominino más próximo a nosotros que a los simios.

La evolución no avanza a paso constante hacia metas prefijadas

Dos décadas después, el centro de atención se desplazó hacia Europa. En 1912 el arqueólogo aficionado Charles Dawson anunció el hallazgo de un cráneo humano y una mandíbula simiesca en una antigua gravera cercana a la localidad de Piltdown, en East Sussex, Inglaterra. Apodado el hombre de Piltdown, se convertiría en uno de los principales candidatos al título de eslabón perdido, hasta que en 1953 se destapó el fraude: no era más que un cráneo humano moderno y el maxilar inferior de un orangután.

El cráneo de Piltdown sedujo de tal modo a los eruditos con la perspectiva de que Europa debía ser la cuna de la humanidad, que a punto estuvieron de ignorar otro vestigio de hominino descubierto en África, más antiguo y primitivo que el de Dubois. En 1925, cuarenta y tres años después de la muerte de Darwin, el anatomista Raymond Dart describió en un artículo un cráneo fósil simiesco provisto de una dentadura con rasgos humanos, hallado en Taung, Sudáfrica. Dart nombró a este fósil de un individuo infantil *Australopithecus africanus*, «el simio del sur de África», cuya antigüedad, sabemos hoy, ronda los 2,8 millones de años. Casi veinte años debieron transcurrir antes de que la comunidad científica aceptase la trascendencia fundamental del niño de Taung: era el vínculo definitivo entre el género humano y los simios africanos.

Desde entonces no han cesado de surgir pruebas sobre el origen africano de la humanidad. Todos los fósiles de más de 2,1 millones de años, y no son pocos, provienen de ese continente.

Aun cuando los descubrimientos paleontológicos demostraron el acierto de Darwin acerca de la cuna de la humanidad, el curso evolutivo seguía siendo un enigma. Este describió la evolución como un proceso de ramificación en el que una especie ancestral se dividía en dos o más especies descendientes. Pero la larga tradición de jerarquización de la naturaleza, que


LOS NEANDERTALES fueron la primera especie extinta de hominino en ser reconocida y la primera de la que se pudo recuperar ADN fósil.

se remonta a la *Scala Naturae* de Platón y Aristóteles, inculcó la noción de que nuestra evolución debía ser lineal, de lo más simple a lo más complejo, de lo primitivo a lo moderno. Ciertas imágenes muy populares reforzaron esa idea, como la caricatura publicada en el Almanaque Punch de 1882, que muestra la progresión desde la lombriz de tierra hasta Darwin, o la icónica ilustración recogida en el libro de 1965 Time-Life «El origen del Hombre», que mostraba la evolución humana desde el mono, conocida como la «Marcha del Progreso».

Sin embargo, gracias a la abundancia de fósiles y de artefactos hallados en todo el mundo durante el siglo pasado en la actualidad los paleoantropólogos pueden reconstruir mucho mejor el curso de la evolución humana. Demuestran sin género de dudas que el esquema lineal simple es insostenible. La evolución no avanza a paso constante hacia metas prefijadas. Y muchos de los especímenes de homininos no pertenecen a nuestro linaje directo, sino a ramas laterales; se puede decir que son experimentos evolutivos que culminaron en la extinción.

Los rasgos que hoy nos definen no evolucionaron al unísono, sino que fueron apareciendo de modo paulatino. Si atendemos al modo de locomoción, los antropólogos denominan bipedismo obligado al del *Homo sapiens*: nuestra anatomía solo nos faculta para caminar por el suelo con las dos piernas. De ser necesario podemos trepar a un árbol, pero hemos perdido las adaptaciones que otros primates poseen para la vida arborícola. Algunos fósiles fragmentarios de los homininos más antiguos (*Sahelanthropus tchadensis* de Chad, *Orrorin tugenensis* de Kenia y *Ardipithecus kadabba* de Etiopía) muestran que nuestros primeros antepasados tienen entre unos 7 y 5,5 millones de años de antigüedad. Y si bien la suya es una morfología muy primitiva en numerosos aspectos, todos exhiben rasgos ligados a la locomoción bípeda, no a la cuadrúpeda. En *Sahelanthropus* el orificio de la base del cráneo donde se inserta la columna vertebral ocupa una posición adelantada, indicadora de una postura erguida. De todo esto se deduce que la marcha bípeda pudo ser uno de los primeros rasgos privativos de los homininos, que nos diferencian de los simios ancestrales.

Con todo, parece que nuestros antepasados conservaron ciertos rasgos netamente arborícolas hasta millones de años después de la aparición del bipedismo. *Australopithecus afarensis*, que vivió en África oriental hace entre 3,85 y 2,95 millones de años, representado por el famoso esqueleto de *Lucy*, descubierto en 1974, era un bípedo apto que, en cambio, conservaba características propias de la trepa, como unos brazos largos y robustos, rematados en unos dedos curvos. Tuvo que transcurrir otro millón de años para que las extremidades adquiriesen las proporciones actuales y con ellas el arraigo definitivo de los homininos con el suelo, iniciado por los primeros *H. erectus* africanos (también llamados *H. ergaster*).

Por su parte, el cerebro ha seguido un derrotero distinto. En el curso de la evolución humana, el tamaño de este órgano se ha triplicado. Pero si comparamos el cráneo de *A. afarensis* con el del mucho más antiguo *Sahelanthropus* comprobaremos que durante los primeros millones de años el volumen no aumentó en absoluto. De hecho, la mayor parte del crecimiento se concentra en los últimos dos millones de años. Posiblemente, un proceso de retroalimentación propiciado por los avances en el dominio de los útiles líticos y similares, facilitó a los homininos el acceso a alimentos más nutritivos como la carne, que aportaron la energía necesaria para mantener un cerebro mayor, más costoso, que a su vez hizo posible la concepción de nuevas técnicas, etc. Al tiempo que el volumen cerebral crecía, su forma y estructura variaban. Las regiones involucradas en las funciones cognitivas complejas, como el lenguaje y la planificación a largo plazo, ganaron en extensión.

La evolución de los homínidos siguió un patrón de mosaico en el que las partes del cuerpo evolucionaron a ritmos distintos, engendrando algunas especies sorprendentes. *Australopithecus sediba*, de Sudáfrica, con 1,98 millones de años, poseía una mano humana articulada a un brazo de rasgos simiescos, un

JAVIER TRUEBA, SCIENCE SOURCE

canal del parto ancho pero un cerebro pequeño, con una articulación del tobillo evolucionada unida a un hueso del talón (calcáneo) arcaico.

En alguna ocasión la evolución llegó al extremo de dar marcha atrás. Cuando se analiza un fósil de hominino puede ser difícil discernir si conserva un rasgo primitivo de un antepasado, como un seso pequeño, o si perdió la modernidad del carácter por evolución inversa. El extraño caso de *H. floresiensis* podría ser un ejemplo de esto último. Este miembro de la familia vivió en la isla de Flores, en Indonesia, hace tan solo 50.000 años. Pese a ello, muchos de sus rasgos eran similares a los de algunos fundadores del género *Homo*, unos dos millones de años más antiguos. No solo su complexión era pequeña, su cerebro era diminuto para ser un miembro de nuestro género, como el de un chimpancé. Los entendidos están casi seguros de que es un descendiente de otro *Homo* mayor, más inteligente, que quedó aislado en Flores y cuyo enanismo constituyó una adaptación a la escasez de recursos en la isla. Su evolución parece, pues, una excepción, un avance en dirección contraria a la que muchos consideraban una tendencia evolutiva inherente a nuestro género: el aumento del cerebro. Con todo, a pesar de su pequeño seso, *H. floresiensis* tallaba herramientas de piedra, cazaba y cocinaba con fuego.

Además de la complejidad de la evolución humana, en la actualidad sabemos que durante la mayor parte del tiempo que esta abarca, sobre la Tierra han convivido varios homininos. Hace entre 3,6 y 3,3 millones años, en África hubo al menos cuatro. El paleoantropólogo Yohannes Haile-Selassie, del Museo de Historia Natural de Cleveland, y su equipo han recuperado en una región remota de Etiopía, Woranso-Mille, los restos de dos, *A. afarensis* y *A. deyiremeda*, y de un hipotético tercero, conocido en exclusiva por un pie fósil, provisto de una morfología distintiva. De qué forma se repartieron el espacio es objeto de investigación. «Las especies competidoras pudieron haber coexistido si los recursos no escaseaban o si explotaban partes diferentes del ecosistema», explica Haile-Selassie.

En una época posterior, hace entre 2,7 y 1,2 millones de años, representantes de *Homo* —armados de herramientas y dotados de un cerebro más voluminoso y mandíbulas y dientes más pequeños— compartían las praderas del sur y del este de África con una rama de la humanidad radicalmente distinta. Eran los miembros del género *Paranthropus*, homininos de mandíbula y dentadura robustas, pómulos prominentes y cresta en la parte superior de la cabeza, que servía como anclaje para una potente musculatura masticadora. En este caso conocemos mejor cómo pudieron convivir: mientras que *Homo* diversificó aparentemente su alimentación, con una amplia variedad de plantas y animales, *Paranthropus* se especializó en vegetales duros y fibrosos.

H. sapiens también coexistió con otros humanos. Cuando hace 300.000 años nuestra especie estaba evolucionando en África, otros homininos vagaban por el planeta. Algunos eran parientes muy cercanos, como los robustos neandertales de Eurasia. Otros, como *H. naledi* en Sudáfrica y *H. erectus* en Indonesia, pertenecían a linajes separados del nuestro hacía largo tiempo. Hace solo 50.000 años todavía había una gran diversidad, pues coexistían los neandertales, los enigmáticos denisovanos de Asia, el diminuto *H. floresiensis* y otro pequeño homínido recientemente descubierto en Filipinas, *H. luzonensis*.

Estos descubrimientos ofrecen una imagen mucho más interesante de la evolución, distinta al punto de vista lineal. Pero surge una pregunta recurrente: ¿por qué *H. sapiens* es la única rama superviviente de un árbol que antaño fue tan exuberante?

Estos son los datos de que disponemos sobre esta cuestión. Gracias a los fósiles hallados en el yacimiento de Jebel Igud, en Marruecos, sabemos que nuestra especie surgió en África hace al menos 315.000 años. Hace unos 200.000 empezó a hacer incursiones fuera de su continente natal y hace 40.000 ya había colonizado toda Eurasia. En algunas de esas regiones nuevas habitaban otros homínidos: todos desaparecieron. Cuando los neandertales se extinguieron en Europa y los denisovanos hicieron lo propio en Asia, hace entre 30.000 y 15.000 años, *H. sapiens* se convirtió en la especie hegemónica del planeta.

En muchas ocasiones semejante éxito se ha atribuido a un intelecto superior. Pero lo cierto es que el cerebro neandertal era ligeramente más voluminoso que el nuestro, aunque el registro arqueológico parecía indicar que solo *H. sapiens* fue capaz de fabricar útiles especializados y de usar símbolos, un indicador de la aptitud para el lenguaje. De ser cierto que la capacidad intelectual fue el motivo, *H. sapiens* quizá pudo imponerse por una mayor capacidad de previsión, mejor tecnología, una alimentación más flexible o redes sociales más extensas con que afrontar los momentos de crisis. Se ha llegado a proponer que pudo hacer la guerra contra sus rivales, hasta el exterminio.

Somos portadores de ADN neandertal y denisovano, fruto de nuestra hibridación con esas especies de humanos en la prehistoria

Pero hallazgos recientes han refutado estas hipótesis. Los arqueólogos señalan que la tecnología de los neandertales era mucho más variada y compleja de lo que se pensaba. También elaboraron joyas y arte, colgantes de conchas y colmillos, además de plasmar símbolos abstractos en las paredes de las cuevas. Tal vez ni siquiera fueran el único pariente extinto dotado de aptitudes artísticas, pues una concha grabada de 500.000 años de antigüedad hallada en Java sugiere que *H. erectus* también poseía pensamiento simbólico. Pero si los homininos arcaicos tuvieron las mismas facultades que *H. sapiens*, ¿por qué prevaleció nuestra especie?

La clave quizá resida en las condiciones en que surgieron esas capacidades. Los datos paleontológicos y arqueológicos apuntan a que durante los primeros doscientos mil años permanecimos mayoritariamente en África. En opinión de algunos expertos, allí evolucionamos como una población dividida, en grupos esparcidos por el continente, separados y vueltos a reunir en reiteradas ocasiones en el curso de milenios, esto es,

períodos de evolución en aislamiento intercalados con períodos de mestizaje e intercambio cultural. Este devenir pudo hacer de *H. sapiens* un hominino especialmente adaptable. Pero el relato no acaba aquí, pues también disponemos de la información genética.

El análisis del ADN ha revolucionado el estudio de la evolución humana. La comparación del genoma humano y el de los grandes simios actuales ha demostrado de modo concluyente que guardamos un estrecho parentesco con el chimpancé y el bonobo, con quienes compartimos casi el 99 por ciento del ADN. Los estudios a gran escala del genoma de poblaciones humanas modernas de todo el mundo ha permitido averiguar el origen de la variación humana y rebatir la idea de que las razas son grupos de orígenes dispares con diferencias biológicas. «Nunca ha habido poblaciones aisladas ni razas puras», afirma Raff. La variación de la humanidad actual es continua y la diversidad es mayor dentro de cada una de las poblaciones y no entre ellas. Es producto de nuestra historia demográfica, que comienza con una especie nacida en África, cuyas poblaciones migrantes se entremezclaron sin cesar durante su periplo por el mundo.

Más recientemente, los estudios de ADN fósil nos han proporcionado información sobre la época en que aparecieron los primeros *H. sapiens* y todavía existían otros homininos. A finales de la década de 1990, los genetistas empezaron a recuperar pequeños fragmentos de ADN de neandertal y de los primeros *H. sapiens* fósiles. Desde entonces no solo han logrado obtener el genoma prácticamente completo de los neandertales y de aquellos primeros *H. sapiens*, sino el de los denisovanos, un grupo enigmático que se conoce a partir de unos pocos fósiles fragmentarios de Siberia y Tíbet. Gracias a la comparación de estos genomas antiguos con el de los humanos actuales, los investigadores han hallado indicios de hibridación de nuestra especie con otras. Fruto de esos cruzamientos ocurridos en el pasado, las personas de hoy en día llevamos ADN neandertal y denisovano. Otros estudios han encontrado más indicios de mestizaje con otros homininos desconocidos de África y Asia, de los que carecemos de fósiles pero cuyo ADN distintivo persiste en nosotros.

La hibridación interespecífica pudo contribuir al éxito de *H. sapiens*. Estudios realizados en otros seres vivos, como los pinzones o los robles, han demostrado que la hibridación con especies locales ayuda a colonizar nuevos entornos, pues aporta genes ventajosos. Si bien queda por descubrir la función de la mayoría de los genes procedentes de homininos extintos que conservamos en nuestro genoma, esta ya se ha identificado en algún caso, con conclusiones sorprendentes. Los neandertales dotaron a *H. sapiens* de ciertos genes del sistema inmunitario que quizá nos ayudaron a combatir los nuevos patógenos que nos encontramos tras nuestra llegada a Eurasia. Los denisovanos nos aportaron un gen que facilitó la adaptación a las grandes altitudes. Quizá *H. sapiens* sea la última especie superviviente, pero posee las ventajas legadas por sus primos extintos.

Ahora contamos con muchas más piezas del rompecabezas del origen humano, pero el problema supera de largo lo imaginado. Quedan multitud de lagunas y algunas no podrán llenarse nunca. Una de las preguntas irresolubles es la razón por la que hemos desarrollado un volumen encefálico tan grande. El cerebro humano pesa alrededor de 1400 gramos y es notablemente mayor de lo esperado para un primate de nuestra talla. Según Wood, «su singularidad la hace tan interesante como irresoluble científicamente». Hay quien supone que el cerebro de los homininos creció mientras se adaptaban a las fluctuaciones climáticas entre las condiciones húmedas y áridas. Pero a juicio de Wood, el problema de dar respuesta a ese tipo de preguntas del «por qué» de la evolución de esos rasgos únicos estriba en que no hay forma de evaluar empíricamente las explicaciones propuestas. «No son contrastables. Es imposible retroceder tres millones de años y cambiar el clima.»

Tal vez las investigaciones futuras resuelvan otras incógnitas. Por ejemplo, todavía no sabemos cuál fue el último antepasado común de los humanos y del género *Pan*, que engloba al chimpancé y al bonobo. Los datos genómicos y paleontológicos enmarcan la divergencia de los dos linajes hace entre ocho y diez millones de años, tres millones antes de que apareciese el fósil más antiguo de hominino bípedo. Es posible, pues, que los paleoantropólogos carezcan aún de gran parte de nuestra prehistoria. Apenas existen fósiles del linaje de *Pan*, que una vez separado del nuestro debió tomar su propio rumbo. Quizá podamos obtener más datos sobre esta cuestión gracias al proyecto en marcha en el centro de Mozambique, donde el equipo de Susana Carvalho y René Bobe, de la Universidad de Oxford, busca fósiles de primates, también de homininos, en sedimentos más antiguos que los de *Sahelanthropus*, *Orrorin* y *Ardipithecus*.

Las etapas posteriores de la historia humana también están plagadas de incógnitas. Sabemos que *H. sapiens* se cruzó con las demás especies de humanos que halló en su camino, ¿pero hubo intercambio cultural entre ellos? ¿Enseñó a los neandertales nuevas técnicas de caza y habilidades artísticas, o sucedió a la inversa? Las nuevas técnicas de recuperación de ADN y proteínas en restos fósiles irreconocibles de ningún otro modo, incluso a partir de los sedimentos acumulados en las cuevas, están permitiendo determinar qué especies habitaron en algunos yacimientos esenciales y en qué momento.

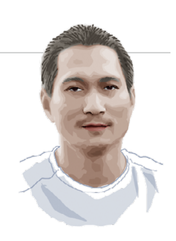
Me pregunto a dónde nos llevarán los próximos 150 años en nuestra búsqueda por entender quiénes somos y de dónde venimos. Quizás hayamos encontrado nuestro lugar en la naturaleza, una pequeña rama del árbol de la evolución, pero seguimos haciéndonos preguntas sobre nosotros mismos. Al fin y al cabo, ¿qué otra cosa somos si no humanos? IyC

EN NUESTRO ARCHIVO

Una historia intrincada. Katherine Harmon en *IyC*, abril de 2013.
El último hominino. Kate Wong en *IyC*, noviembre de 2018.

por Quan-Hoang Vuong

Quan-Hoang Vuong es director del Centro Interdisciplinar de Investigaciones Sociales de la Universidad Phenikaa, en Hanói.



¿Cómo retractarse en ciencia?

La comunidad científica debe acordar cuál es la información esencial que hay que comunicar al retirar un artículo

El pasado junio, el *New England Journal of Medicine* y *The Lancet* retiraron sendos estudios sobre tratamientos de la COVID-19 que habían generado polémica, pero ninguna de las dos revistas reconoció la influencia que tuvieron las críticas del público. No son los primeros artículos sobre la pandemia que acaban retirados, a menudo con pocas explicaciones. El blog Retraction Watch lleva la cuenta.

Las retractaciones son fundamentales para que la literatura científica sea digna de confianza, pero carecen de un formato universal y son poco informativas. Estas deficiencias impiden evaluar los artículos y las estrategias para promover la integridad, y también estigmatizan la sinceridad de reconocer un error. Sería útil que añadieran más información.

El año pasado analicé más de 2000 escritos de retractación de entre los más de 20.000 que recopilan Retraction Watch y otras grandes editoriales. Algo más de la mitad no indicaban quién inició la retractación, y cerca del 10 por ciento, tampoco el motivo. Ha habido muchas propuestas de mejora de la información, pero ninguna ha calado. Una medida manejable sería implantar un modelo universal de retractación que aportase cuatro informaciones básicas: la persona que la inició; el motivo (errores graves, plagio, fraude); si ha habido acuerdo entre la revista y los autores; y si se ha producido algún tipo de revisión posterior a la publicación (como los comentarios en PubPeer). Este modelo, en mi opinión, haría que investigadores e instituciones fomentasen las retractaciones cuando fuesen necesarias.

Tal como están ahora las cosas, la vergüenza impide a los científicos admitir sus errores. Sin embargo, muchos han sido alabados por reconocerlos, como el equipo de la nóbel de química Frances Arnold, que este año se retractó de un artículo sobre síntesis enzimática. En el escrito se mencionaba la causa y quién inició el proceso, lo que permitía a los lectores valorar la honestidad y la voluntad de enmienda de un equipo tan prestigioso. Si esa transparencia fuera la norma, la retractación resultaría menos dolorosa y el público entendería mejor cómo funciona la ciencia.

Han pasado más de diez años desde que el Comité de Ética en Publicación (COPE, por sus siglas en inglés) formulara recomendaciones para que las retractaciones fuesen más informativas y las editoriales les indicaran, entre otros aspectos, quién propuso la retractación y por qué. Pero apenas se han apreciado cambios desde entonces, según revela mi análisis.



GETTY IMAGES/DRAFTER123/ISTOCK

El modelo de cuatro elementos informativos que propongo no está exento de dificultades. El segundo (el motivo de la retractación) quizás es el más peliagudo. Aunque es la revista la que decide retirar un artículo, suelen ser las instituciones científicas las que indagan si ha habido mala praxis. Como estas averiguaciones acostrumbran a ser lentas y poco concluyentes, las revistas se escudan en términos más neutros e inofensivos, como «error», «extravío de datos» o «imposibilidad de reproducir los resultados». El proceso podría agilizarse con una lista de verificación, publicada a inicios de 2020, para detectar problemas sin necesidad de una declaración formal de mala praxis.

Aquí es donde entra en escena el tercer elemento de la retractación. Es evidente que la revista y los autores pueden tener motivos distintos para retirar un artículo, y que no necesariamente tienen que estar de acuerdo con el texto final.

El cuarto elemento refuerza el papel de los usuarios como salvaguardia de la literatura científica y les reconoce ese mérito. En este sentido, los denunciantes pueden mantenerse en el anonimato si lo desean, pero la revista o la institución deben explicar qué hicieron para investigar los problemas denunciados.

Creo que reformar el proceso de retractación promovería el buen hacer profesional. El modelo propuesto ofrecería una norma editorial, sobre todo a las economías emergentes. Y la transparencia permitiría que los investigadores y las revistas de todo el mundo conocieran los errores y las negligencias que merecen una retractación, así como los claroscuros de desacuerdo. Además, las revistas deberían obligar a los autores a incluir una sección gratuita sobre las limitaciones del artículo, igual que el resumen. Una reseña formal de los defectos impediría que tanto los autores como el público exagerasen los datos publicados.

Las retractaciones exponen fallos y posibles negligencias en las investigaciones, pero también demuestran que el mecanismo de detección de errores funciona bien. Con esta premisa, tenemos que rehabilitar el concepto. Las retractaciones no son algo infame: son una manera práctica de corregir la falibilidad humana y fortalecer el quehacer científico.

Artículo original publicado en *Nature* vol. 528, pág. 149, 2020. Traducido con el permiso de Nature Research Group © 2020

Con la colaboración de nature

por Adrián López Quirós

Glauconita, un indicador paleoambiental

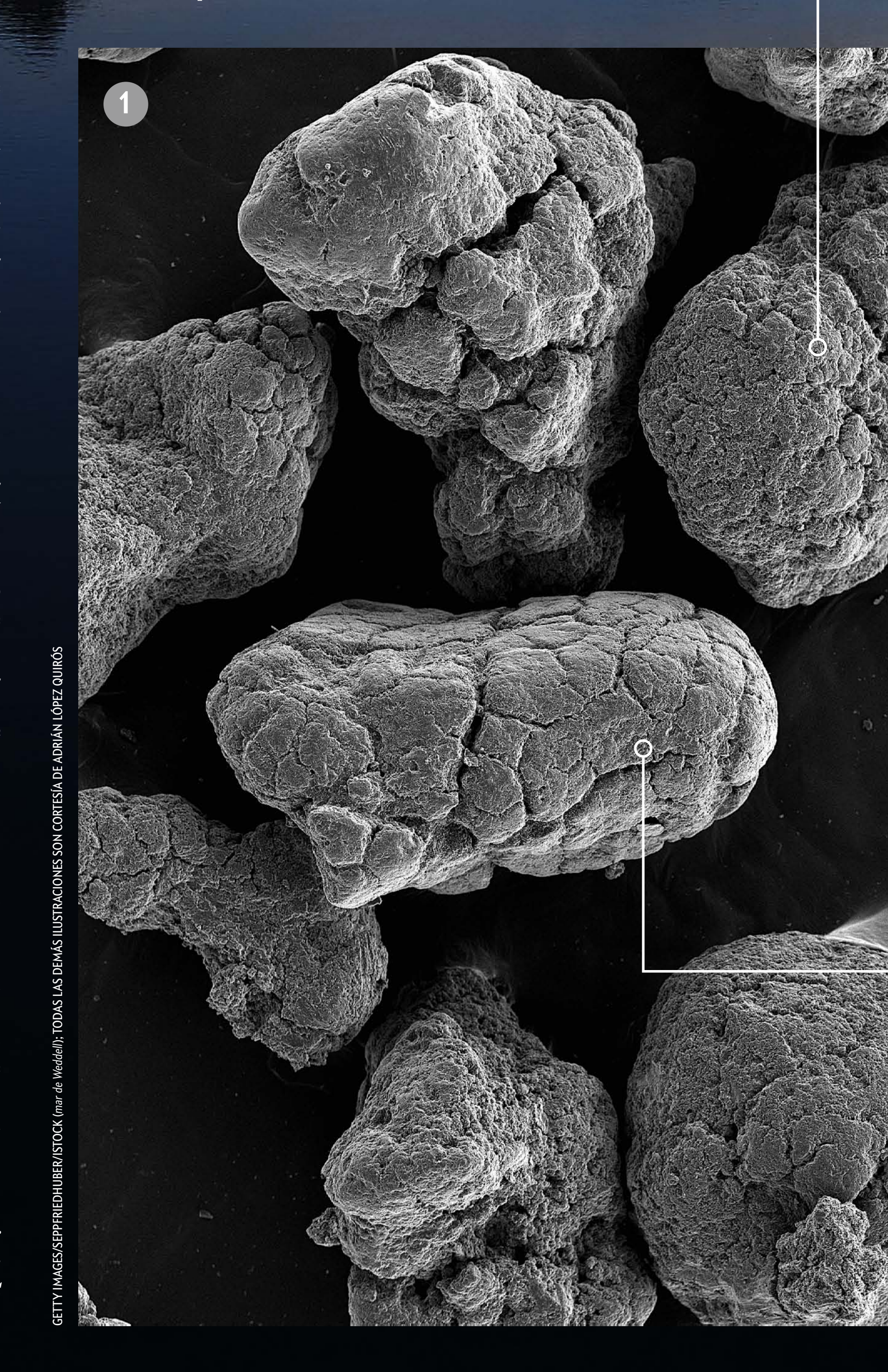
El estudio de este mineral ofrece información sobre las condiciones del ámbito marino en las que se formó

La glauconita es un mineral de coloración verdosa, una arcilla rica en potasio y hierro que se forma principalmente en entornos marinos de poca profundidad (de menos de 500 metros), en condiciones de escasa oxigenación y temperaturas inferiores a los 15 °C. Su creación está promovida por la actividad microbiana en la interfase que existe entre el agua y el sedimento del fondo. Debido a las circunstancias particulares en las que se forma, los geólogos la utilizan como indicador de un ambiente pretérito de baja sedimentación y de ciertos cambios en el nivel del mar.

En las últimas décadas se había identificado este mineral en secuencias sedimentarias del océano Antártico. Su origen es anterior a una de las principales transiciones climáticas de la historia de la Tierra, la del Eoceno-Oligoceno, hace entre 34 y 33,6 millones de años. En dicha transición se produjo la apertura de los pasos oceánicos australes más importantes: el paso de Drake y el estrecho de Tasmania. Dicha apertura posibilitó la libre transferencia de masas de agua entre los océanos Atlántico y Pacífico y dio lugar al desarrollo de la corriente Circumpolar Antártica, la cual contribuyó al aislamiento térmico y a la formación del casquete de hielo continental.

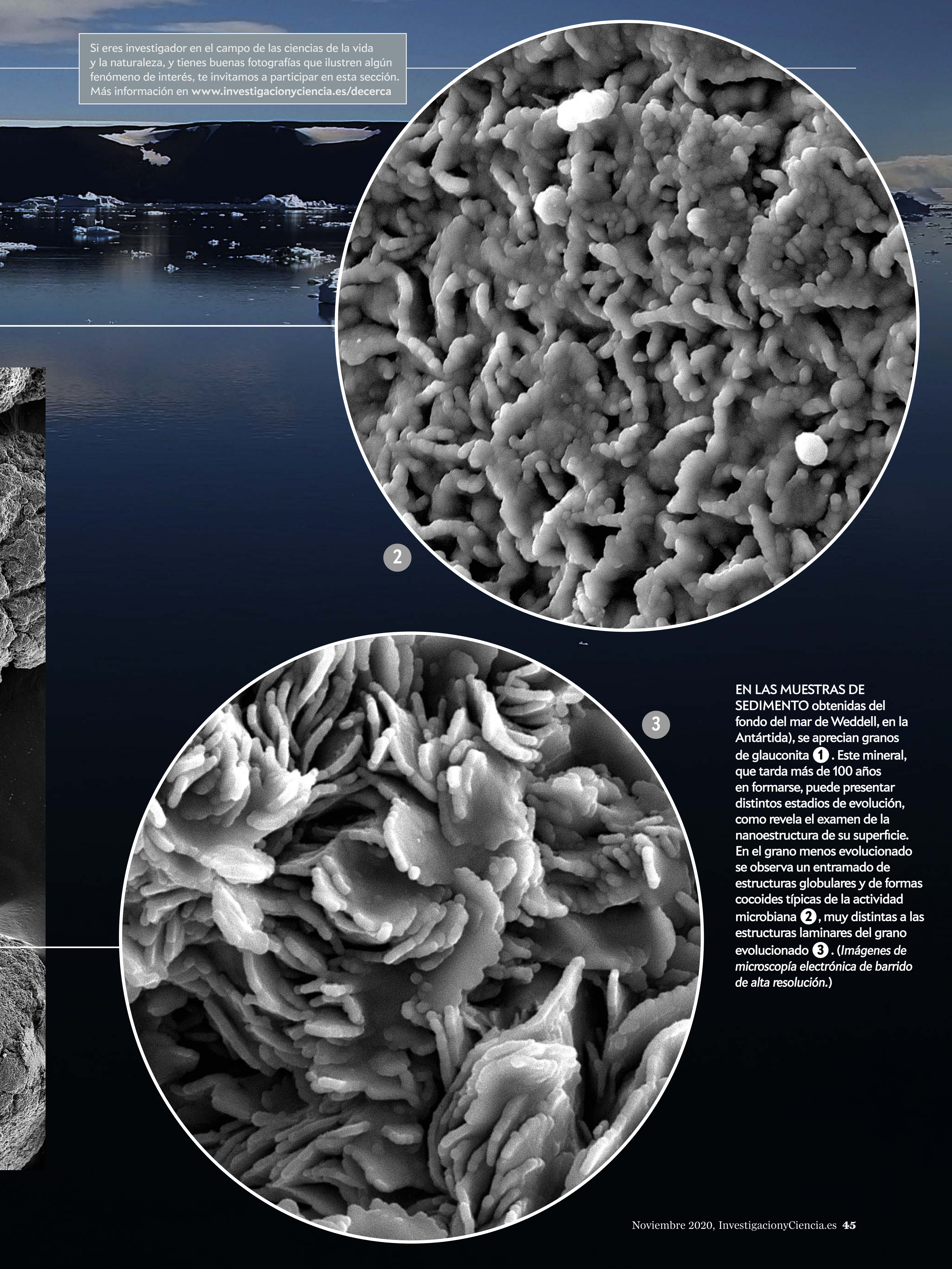
A pesar de tener constancia de la presencia de glauconita en la región, no se habían evaluado las implicaciones paleoambientales derivadas del estudio de su génesis y evolución. Nuestro trabajo, publicado en la revista *Scientific Reports*, describe ahora un importante evento de glauconitización en el océano Antártico hace 35,5 millones de años, lo que ofrece pistas importantes sobre la historia del clima en el continente durante la Era Cenozoica. La formación de glauconita marca así el inicio de proceso de subida del nivel del mar en el norte del mar de Weddell en el Eoceno tardío. Los resultados derivados de este trabajo proporcionan nuevas ideas sobre los cambios en las condiciones paleoceanográficas de la Antártida.

—Adrián López Quirós es investigador del Instituto Andaluz de Ciencias de la Tierra, del CSIC y la Universidad de Granada.



GETTY IMAGES/SEPPFRIEDHUBER/ISTOCK (*mar de Weddell*); TODAS LAS DEMÁS ILUSTRACIONES SON CORTESÍA DE ADRIÁN LÓPEZ QUIRÓS

Si eres investigador en el campo de las ciencias de la vida y la naturaleza, y tienes buenas fotografías que ilustren algún fenómeno de interés, te invitamos a participar en esta sección. Más información en **www.investigacionyciencia.es/decerca**



EN LAS MUESTRAS DE SEDIMENTO obtenidas del fondo del mar de Weddell, en la Antártida), se aprecian granos de glauconita ❶. Este mineral, que tarda más de 100 años en formarse, puede presentar distintos estadios de evolución, como revela el examen de la nanoestructura de su superficie. En el grano menos evolucionado se observa un entramado de estructuras globulares y de formas cocoides típicas de la actividad microbiana ❷, muy distintas a las estructuras laminares del grano evolucionado ❸. (*Imágenes de microscopía electrónica de barrido de alta resolución.*)



MEDICINA

EL RETORNO *de las* EPIDEMIAS

GRACIAS A LOS FÁRMACOS Y LAS VACUNAS, DURANTE MÁS DE UN SIGLO SE HAN LOGRADO AVANCES ESPECTACULARES CONTRA LAS ENFERMEDADES INFECCIOSAS. AHORA, NUESTRA MEJOR DEFENSA PODRÍAN SER LOS CAMBIOS SOCIALES

Maryn McKenna

Ilustración de Maria Corte

Maryn McKenna es periodista especializada en salud pública, salud global y política alimentaria, y profesora del Centro para el Estudio de la Salud Humana de la Universidad Emory (Atlanta). Su último libro es *Big chicken: The incredible story of how antibiotics created modern agriculture and changed the way the world eats* (National Geographic Books, 2017).



En 1972, el prestigioso virólogo Frank Macfarlane Burnet se ufanaba del camino recorrido en el siglo XX, con notoria satisfacción, desde la cuarta edición de su libro *Historia natural de la enfermedad infecciosa*. Ese mismo año, en los Estados Unidos se había puesto fin a la vacunación sistemática contra la viruela, enfermedad que se había conseguido eliminar en el país. El año anterior se había autorizado la triple vírica (contra el sarampión, la rubeola y la parotiditis), mientras que cuatro años antes, en 1968, se había sofocado una pandemia de gripe con una nueva fórmula vacunal. En 1960, Albert Sabin administró la vacuna oral contra la poliomielitis, cinco años después de que Jonas Salk fabricarse la primera vacuna antipoliomielítica inyectable, que consiguió prevenir la terrorífica parálisis que se cebaba con los niños todos los veranos.

Desde la Segunda Guerra Mundial se habían obtenido doce clases de antibióticos, comenzando por la penicilina natural, un logro que parecía haber terminado para siempre con la amenaza de las mortíferas infecciones asociadas a dolencias infantiles, heridas, intervenciones quirúrgicas y partos.

Pocas páginas antes de terminar el libro (cuyo coautor es David O. White), Burnet lanza una predicción aventurada: «el pronóstico más probable para el futuro de la enfermedad infecciosa», augura, «es que será muy gris».

Burnet era un reputado científico que en 1960 había compartido el premio Nobel de fisiología o medicina por sus ideas pioneras sobre la tolerancia inmunitaria adquirida [*véase* «El mecanismo de la inmunidad», por Macfarlane Burnet; *Temas* de *IyC* n.º 25, 2001]. A sus 73 años, había vivido epidemias pavorosas, incluida la pandemia de gripe que asoló el planeta en 1918, cuando era estudiante universitario en Australia, así que había sido testigo de muchos avances y había participado de otros tantos. «Desde los albores de la agricultura y de la vida urbana hasta bien entrado el siglo actual, la enfermedad infecciosa constituyó la principal causa global de la mortalidad humana», escribe en la primera página del libro, y proclama: «Hoy día ha quedado modificado, al menos temporalmente, todo el modelo de la ecología humana».

Cuatro años después de que Burnet formulara su optimista predicción, el director de una escuela rural, en lo que hoy es la República Democrática del Congo, se desplomaba y fallecía por un trastorno hemorrágico desconocido: era la primera víctima del virus del Ébola. Nueve años después, en 1981, varios médicos de Los Ángeles y un epidemiólogo de los Centros para el Control y la Prevención de Enfermedades de los Estados Unidos diagnosticaban una neumonía oportunista a cinco varones jóvenes. La primera señal de la pandemia de sida. En 1988, la bacteria intestinal *Enterococcus,* causa habitual de infecciones hospitalarias, se volvió resistente al antibiótico de último recurso, la vancomicina, y se convirtió en la primera bacteria multirresistente. Y en 1997, la cepa H5N1 del virus de la gripe saltó de las aves de corral a los humanos, en un mercado de Hong Kong, y mató a un tercio de las personas que infectó, iniciando la primera de varias olas mundiales de gripe aviar.

Esas epidemias son solo algunas de las enfermedades infectocontagiosas que afligen a las poblaciones humanas todos los años, y los esfuerzos de la medicina moderna por contenerlas han tenido que renovarse y acelerarse. Algunas son nuevas en nuestra especie; otras se producen cuando resurgen antiguos enemigos. Las hay pequeñas, como el brote de gripe aviar H7N7 de 2003, que afectó a 86 trabajadores de una explotación avícola en Holanda. Ahora, una enfermedad totalmente inédita, la COVID-19, ha provocado una pandemia mundial con millones de enfermos y más de un millón de muertos.

Ninguno de estos escenarios se ajusta a lo que predijo Burnet, que veía nuestro triunfo sobre las enfermedades infecciosas como el de un alpinista que alcanza la cumbre de una montaña.

EN SÍNTESIS

Dos logros fundamentales del siglo XX, los antibióticos y las vacunas, parecían haber terminado con las epidemias que habían afligido a la humanidad hasta entonces. En los años 70 se auguraba que, gracias a esos avances, las enfermedades infecciosas dejarían de ser la principal causa de la mortalidad humana.

Sin embargo, varias epidemias posteriores, entre ellas las del ébola, el sida, la gripe y la actual COVID-19, han desmentido ese pronóstico.

Para contenerlas, los esfuerzos de la medicina moderna han tenido que renovarse y acelerarse. Pero estos solos no bastarán y deberán corregirse también las condiciones que propician la aparición de nuevas enfermedades, sobre todo la pobreza y las desigualdades sociales.

Más adecuado sería ver nuestra lucha contra los microbios como una travesía por un mar encrespado. A veces, surcamos las olas airosos, pero otras, como en la actual pandemia, corremos el riesgo de hundirnos.

Resulta difícil, bajo el peso del nuevo coronavirus, retroceder en la historia de Estados Unidos para ver que parte de la experiencia de los primeros colonos de Nueva Inglaterra era, sorprendentemente, librarse de las infecciones. Desde principios del siglo xvii, aquellos emigrantes abandonaban las ciudades europeas, mugrientas y plagadas de epidemias, donde con suerte vivirían hasta los cuarenta años, para encontrarse en un paraje bucólico, bendecido por Dios o por la buena fortuna, donde el hombre —y la mujer que sobreviviera a los partos— podía duplicar esa esperanza de vida: algo extraordinario.

Eso era así para los colonos, por supuesto, pero no para los indígenas a quienes desplazaron. Los españoles, que llegaron a la América central y meridional un siglo antes, y los demás europeos que fueron poblando la América septentrional llevaron consigo enfermedades tan devastadoras para las poblaciones nativas que, según cálculos de los investigadores, mataron al 90 por ciento de los lugareños. Tampoco era así para los esclavos importados a las costas estadounidenses, cuyas vidas se vieron truncadas por el maltrato y las penurias en las plantaciones de algodón.

Hasta el siglo xix, las enfermedades infecciosas entre los pobladores de Nueva Inglaterra tuvieron un comportamiento «muy extraño e inusual», afirma David K. Rosner, historiador y codirector del Centro de Historia y Ética de la Salud Pública de la Universidad de Columbia (Nueva York). «Por descontado había brotes infecciosos (de viruela, fiebre amarilla, etcétera), pero solían quedar muy localizados y duraban poco.»

Todavía a principios del siglo xix, la enfermedad se entendía como una amonestación por inmoralidad: en este sentido, la epidemia «visitaba» una población descarriada para conminarla a recuperar la rectitud. En 1832, los buques mercantes trajeron al litoral oriental de los Estados Unidos una pandemia de cólera. Los gobernadores de una docena de estados decretaron un día de plegaria y ayuno obligatorios. En Nueva York, las clases adineradas escaparon de la ciudad y se refugiaron en el campo, donde podían mantener la distancia social y desde donde culpaban a los pobres de su propia desgracia. Una carta conservada en la Sociedad Neoyorquina de Historia, escrita por el fundador de la institución, pone de manifiesto la crueldad de algunos de los más pudientes: «A los enfermos, [...] en su mayoría pertenecientes a la escoria de la ciudad, [...] cuanto antes se los despache, antes terminará la epidemia».

El cólera era causa de calamidades en todo el mundo, pero también abrió la puerta a nuestro conocimiento moderno de la enfermedad. En aquella época se creía que los agentes causales eran los miasmas, efluvios malignos de la basura, la podredumbre y las aguas estancadas. Todavía en 1874 (veinte años después de que el médico John Snow trazara el origen de un brote de cólera en Londres a una fuente pública y lo contuviera retirando el manubrio), una conferencia internacional sobre la enfermedad declaró que «el aire ambiente es el principal vehículo del germen del cólera». Tuvieron que pasar otros diez años, cuando el bacteriólogo Robert Koch observó bacterias idénticas en las heces de varios enfermos en la India y consiguió que se reprodujesen en un medio de cultivo, para que se demostrase que un microbio era la causa de la enfermedad. (Koch ignoraba que el bacteriólogo italiano Filippo Pacini había hecho la misma observación el año que Snow quitó la manivela del pozo londinense.)



JONAS SALK inocula la vacuna antipoliomielítica a una niña en los años 50, una victoria sobre una enfermedad terrorífica.

GETTY IMAGES

Esta explicación sobre el origen del cólera se convirtió en uno de los fundamentos de las teorías microbiológicas. La idea de que se pudiese identificar, y posiblemente detener, a los agentes infecciosos transformó la medicina y la sanidad. Así se desencadenó una explosión de innovación y compromiso cívico, en un afán irrefrenable por limpiar las ciudades, cuyos inmundos callejones se veían como el entorno ideal para que medrasen los microbios patógenos. Se establecieron dependencias municipales de higiene y saneamiento, se construyeron alcantarillas y sistemas de suministro de agua, se reguló la salubridad de los alimentos y se ordenaron reformas en las viviendas.

Estas mejoras empujaron a las naciones industrializadas hacia lo que luego se llamaría la «transición epidemiológica», concepto acuñado por Abdel Omran en 1971 para definir el momento en que se reduce la mortalidad por las infecciones y las enfermedades crónicas pasan a ser la prioridad. La ciencia, a comienzos del siglo xx, se lanzó a una escalada aparentemente imparable: el descubrimiento de los virus, el perfeccionamiento de las vacunas, el desarrollo de los antibióticos, la obtención de las inmunoterapias, la descodificación del genoma humano. En Estados Unidos, la esperanza de vida pasó de una media de 47 años en 1900 a 76 a finales de siglo. El último caso de viruela, la única enfermedad humana que se ha conseguido erradicar, se registró en 1978. La Organización Panamericana de la Salud declaró su intención de eliminar la poliomielitis del continente en 1985. El futuro parecía seguro.

Pero no lo era. En 1988, Robert Gallo y Luc Montagnier escribían en esta revista: «Hace apenas una década, se creía que las enfermedades infecciosas ya no eran un problema acuciante en el mundo desarrollado. Parecía que los nuevos desafíos de la salud pública eran las enfermedades no infecciosas, como el cáncer, las cardiopatías y los trastornos degenerativos. Esa confianza quedó hecha añicos cuando irrumpió el sida a principios de los ochenta».

Gallo y Montagnier habían descubierto el VIH, cada uno con su equipo en su respectivo país [*véase* «El SIDA en 1988», por Robert C. Gallo y Luc Montagnier; Investigación y Ciencia, diciembre de 1988]. Cuando escribieron aquel artículo, en el mundo había más de 77.000 casos conocidos de sida. (Ahora son casi 75 millones.) Como bien señalaban, el descubrimiento reventó la fantasía de haber conquistado las enfermedades infecciosas. Cuatro años después, 19 eminentes científicos reunidos por el Instituto de Medicina de los Estados Unidos (ahora integrado en la Academia Estadounidense de Ciencias, Ingeniería y Medicina) ampliaron sus argumentos en una sobria valoración de lo que denominaron «infecciones emergentes». Según ellos, los científicos y los políticos se habían dejado llevar por la complacencia, confiados en la protección ofrecida por las vacunas y los antibióticos, e insensibles a los riesgos epidemiológicos que entrañan el crecimiento demográfico, el calentamiento climático, los viajes internacionales y la destrucción de entornos naturales para asentamientos humanos y megaexplotaciones agropecuarias.

«Ya no hay ningún lugar del mundo que quede lejos», advertía el grupo de científicos, «ni nadie de quien estemos desconectados». Urgían a introducir mejoras en la detección y notificación de enfermedades, el intercambio de datos, las capacidades de diagnóstico, los antibióticos y las vacunas. Sin ellas, vaticinaban, el mundo siempre estaría rezagado cuando nuevas enfermedades diesen el salto a los humanos, y el retraso en aplicar curas o prevenciones tendría consecuencias catastróficas.

Aquella advertencia resultó profética. En ese momento Estados Unidos se recuperaba del primer rebrote importante de sarampión desde que comenzaran las campañas vacunales en la década de los 60. En tres años se produjeron más de 50.000 casos, cuando los modelos epidemiológicos predecían menos de 9000. El año siguiente a la publicación del informe del Instituto de Medicina, cinco jóvenes sanos fallecieron en el sur de los Estados Unidos por un hantavirus transmitido por roedores. En 1996, un equipo de investigadores de Chicago constató que los estafilococos multirresistentes habían conseguido escapar de su entorno hospitalario habitual para afectar a niños sanos sin factores de riesgo, provocándoles cuadros infecciosos muy virulentos. En los sistemas sanitarios, las ciudades y la naturaleza, parecía que se desmoronaban decenios de progreso.

«Nos olvidamos de lo que eran las epidemias infecciosas», comenta Katherine Hirschfeld, profesora de antropología en la Universidad de Oklahoma, que estudia la salud pública en los Estados fallidos. «La ciencia nos construyó un mundo mejor, y nosotros nos confiamos, nos engreímos y decidimos que ya no merecía la pena invertir en ella».

Pero a diferencia de las epidemias del pasado —el cólera, del que huían los burgueses acaudalados; la tuberculosis y la peste, achacadas a los inmigrantes; o el sida, por el que se estigmatizó a los homosexuales—, las infecciones de hoy no traen consigo un chivo expiatorio (por mucho que intenten encontrarlo ciertos politicastros). No hay ningún tipo de persona o de lugar que podamos evitar; la mundialización del comercio, los viajes y los movimientos migratorios hacen que todos seamos vulnerables. «Ya no podemos dividir el mundo entre los países que han abordado las enfermedades infecciosas con éxito y los que no», sostiene Hirschfeld, sino que «los países tienen enclaves de inmensa riqueza y enclaves de pobreza. Los pobres trabajan para los ricos, ya sea como obreros, jardineros o peones de fábrica. No es posible contener el riesgo».

El planeta que se abandonó a la confianza en el siglo xx es el planeta que ha permitido la propagación de la COVID-19. En los cinco años antes de que el virus SARS-CoV-2 emprendiese su periplo mundial, hubo otros tantos avisos sobre la inminencia de una enfermedad emergente: en los artículos científicos, en los informes federales, en los juegos bélicos de los laboratorios de ideas y en los expedientes elaborados en la Casa Blanca ante la llegada de nuevos equipos. El nuevo coronavirus se ha colado por fisuras de las que estábamos advertidos: es una enfermedad propia de la fauna silvestre que se ha transmitido a los humanos por la proximidad y la depredación, que se disemina a gran velocidad por los viajes en avión, que se aprovecha de las deficiencias de vigilancia y que se amplifica por los nacionalismos y las desconfianzas mutuas.

No nos habíamos preparado, no teníamos ni vacuna ni antivíricos. En las anteriores epidemias de coronavirus, como el SARS de 2003 y el MERS de 2012, se comenzó a buscar una vacuna, pero los fondos se agotaron en cuanto remitieron los brotes. Si las investigaciones hubiesen continuado, quizá ahora se podría acortar la actual emergencia. Las inmunizaciones y los tratamientos farmacológicos son los logros fulgurantes del siglo xx, pero los científicos que trabajan en enfermedades emergentes barruntan que no nos bastará con repetir aquellas hazañas para salvarnos. En su opinión, es igualmente urgente analizar y corregir las condiciones que propician la aparición de nuevas enfermedades.

«La pobreza influye más que cualquiera de nuestras intervenciones técnicas», asegura Peter J. Hotez, médico dedicado al desarrollo de vacunas y decano fundador de la Escuela de Medicina Tropical de la Universidad Baylor (Texas). «El caos político, el cambio climático, la urbanización, la deforestación: todos estos factores lastran nuestro progreso. Ya podemos diseñar todas las vacunas y los fármacos que queramos, pero a menos que consigamos solventar esos otros problemas, siempre estaremos atrasados.»

Las palabras de Hotez se ven reflejadas en los colectivos que más sufren la pandemia actual: usuarios del transporte público, inquilinos de viviendas de protección oficial, internos de residencias geriátricas o víctimas del racismo estructural, cuya vulnerabilidad no radica esencialmente en la falta de fármacos o vacunas. «Tengo el hospital saturado de enfermos de COVID-19», lamenta el especialista en enfermedades infecciosas Brad Spellberg, director médico del Hospital Clínico del Condado de Los Ángeles, adscrito a la Universidad del Sur de California, que es uno de los mayores hospitales públicos de los Estados Unidos. «A las personas que atendemos les resulta imposible guardar la distancia social: indigentes, presos, trabajadores precarios que viven realquilados con su familia de cuatro personas en una habitación...»

El término que se utiliza para lo que describen Hotez y Spellberg es «determinantes sociales de la salud». La expresión es insatisfactoria, porque no posee la rotundidad de «vacuna» o «fármaco», pero es un concepto crucial y cuantificable: que los factores sociales y económicos, no solamente los biológicos o inmunitarios, influyen poderosamente sobre el riesgo de enfermar. Los determinantes negativos son la insalubridad de la vivienda, las deficiencias sanitarias, la precariedad laboral e incluso la falta de representación política. Son la causa profunda de que un país como los Estados Unidos, el más rico del planeta, tenga una incidencia cada vez más alta de hepatitis, enfermedades venéreas y parasitosis transmitidas por el agua, tal como denunciaba en esta revista en 2019 Robert M. Sapolsky, de la Universidad Standford. Son infecciones que primero aparecen entre los pobres e indigentes, pero luego se desplazan a los sectores prósperos y

acomodados. Un estudio de los epidemiólogos británicos Richard Wilkinson y Kate Pickett demuestra que la desigualdad social va aparejada a la enfermedad: cuanto mayor es la diferencia entre la renta de los más ricos y la de los más pobres de un país, menor es la esperanza de vida y mayor es la incidencia de afecciones crónicas, maternidad en la adolescencia y mortalidad infantil. Este fenómeno explica en gran medida por qué la COVID-19 ha sido tan devastadora en Nueva York, una de las ciudades con más desigualdad económica de Estados Unidos, antes de que se aplicase la fuerza bruta del confinamiento para aplacarla.

El confinamiento es eficaz, pero no se puede mantener indefinidamente. Además, acarrea toda una serie de riesgos graves de salud mental y de otras patologías cuando se interrumpe la asistencia sanitaria habitual. Mediante las cuarentenas se puede impedir que el microbio circule durante un tiempo, pero no se puede impedir que aparezca un virus nuevo y que encuentre un hospedador humano favorable. Lo que sí podría prevenir o reducir esa posibilidad es una mayor prosperidad y una distribución más equitativa de la riqueza: suficiente para que los aldeanos del sudeste asiático no tengan que cazar murciélagos a fin de complementar sus ingresos, o para que los empleados precarios de Estados Unidos no tengan que ir al trabajo enfermos por no disponer de bajas retribuidas. Una transición hacia la equidad, si no una transición epidemiológica.

Es difícil enumerar los aspectos del que sería un mundo más protegido sin que parezcan una vaga lista de deseos: viviendas más dignas, rentas más altas, mejor asistencia sanitaria, mayores oportunidades. Aun así, los cambios que algunos países están introduciendo para defenderse de la actual epidemia pueden servir de defensa contra epidemias futuras: cerrar calles al tráfico para fomentar el uso de la bicicleta, como ha hecho Lisboa; aprovechar espacios de aparcamiento para ampliar las terrazas de los cafés, como ha hecho París; e instalar redes de banda ancha para facilitar el teletrabajo y la telemedicina, como se propone en Estados Unidos. Estas adaptaciones parecen fruto de un optimismo tecnológico, pero quizá nos ayuden a construir una sociedad donde no tengamos que aglomerarnos en espacios malsanos y donde la renta no esté vinculada a la geografía.

Sin duda, también hay que reactivar las inversiones en preparación, por cuyo abandono hace casi treinta años reprendió el Instituto de Medicina al Gobierno estadounidense. «Tenemos que planteárnoslo como si fuese un seguro», explica Harvey Fineberg, médico y presidente de la Fundación Gordon y Betty Moore, que dirigía el Instituto de Medicina cuando este preparaba su informe de seguimiento de 2003 sobre la anterior advertencia. «Si no se nos ha quemado la casa a 31 de diciembre, no nos daremos cabezazos contra la pared, preguntándonos para qué pagamos un seguro contra incendios. El seguro lo contratamos para paliar las consecuencias de un posible siniestro. Esa es la mentalidad que tenemos que adoptar ante las pandemias.»

Estados Unidos ha respondido al coronavirus con un esfuerzo extraordinario, auspiciado con fondos federales, para diseñar y ensayar una vacuna en muy poco tiempo, a fin de poder administrar 300 millones de dosis para principios de 2021. Se trata de un anhelo desaforado, ya que lo mínimo que se ha tardado jamás en diseñar una vacuna desde cero son cuatro años (la antiparotidítica). Es incuestionable que la medicina está mejor dotada ahora que cuando Burnet escribía en los años 70; la *Historia natural de la enfermedad infecciosa* se publicó antes de los anticuerpos monoclonales, antes de las terapias génicas, y antes de que hubiera vacunas contra el cáncer y no solo contra los microbios. La apoteosis de toda esta labor, que vio la luz en 2017, posiblemente sean los linfocitos T-CAR, células inmunitarias modificadas por ingeniería genética para expresar un receptor quimérico específico de un antígeno propio de las células cancerosas, como tratamiento de ese tipo de cáncer en concreto.

Pero los T-CAR también demuestran cómo las enfermedades infecciosas han caído en el hoyo del olvido. Los T-CAR sirven para tratar a contados pacientes contra enfermedades minoritarias, a un precio astronómico que ronda los 500.000 dólares (sin contar lo que le suman las aseguradoras médicas), mientras que los antibióticos, que salvan la vida a millones de personas, peligran. Los laboratorios farmacéuticos que los fabricaban en los años 70 (Eli Lilly, AstraZeneca, Bristol-Myers Squibb y Novartis, entre otros) han dejado de hacerlo, porque ya no les reportan suficientes beneficios. En el último año, han quebrado tres pequeñas biotecnológicas que comercializaban nuevos antibióticos. Esto es así a pesar de que estos fármacos son un elemento esencial de la medicina, y ahora se hace evidente que los necesitaremos en algunos enfermos de COVID-19 para tratar las neumonías severas que sobrevienen a la infección vírica inicial.

Mejorar la estructura de preparación (vigilancia epidemiológica, financiación para nuevos fármacos y vacunas, diagnóstico rápido e informes exhaustivos) no garantiza de por sí un planeta invulnerable a las pandemias, o no más que vaciar las calles de coches o disponer de una sanidad barata más accesible. Pero nos podría colocar en un punto de partida, una posición en la que estemos más seguros como sociedad, más protegidos ante las enfermedades conocidas y mejor dispuestos para detectar amenazas desconocidas e innovar como respuesta.

El historiador David Rosner alude a la llamada «era progresista» de los Estados Unidos (1890-1920) y se pregunta cuál podría ser el equivalente después de la COVID-19. «En el siglo XIX construimos toda la infraestructura hídrica, limpiamos todas las calles de las ciudades», relata. «Hemos estrechado tanto nuestra visión del mundo que nos consideramos incapaces de superar estos problemas. Pero hubo momentos, en crisis anteriores, en que los ángeles de nuestra sociedad ocuparon un lugar preponderante: después de la gran depresión, o durante el *New Deal*. No es imposible hacer frente a la crisis actual.» IyC

PARA SABER MÁS

Hives of sickness: Epidemics and public health in New York City. David K. Rosner. Rutgers University Press, 1996.

The epidemiologic transition: A theory of the epidemiology of population change. Abdel R. Omran en *Milbank Quarterly*, vol. 83, págs. 731–757, diciembre de 2005.

Desigualdad: Un análisis de la (in)felicidad colectiva. Richard Wilkinson y Kate Pickett. Turner Publicaciones, 2009.

Microbial insurgency: Theorizing global health in the Anthropocene. Katherine Hirschfeld en *The Anthropocene Review*, vol. 7, págs. 3-18, abril de 2019.

Forgotten people, forgotten diseases: The neglected tropical diseases and their impact on global health and development. Peter J. Hotez. Wiley, 2013.

EN NUESTRO ARCHIVO

Salud global. El reto de las enfermedades infecciosas en la era de la globalización. VV.AA. Colección TEMAS, n.º 94, 2018.

Desigualdad económica y salud pública. Robert Sapolsky, en *IyC*, enero de 2019.

La pandemia de COVID-19 a la luz de la historia de la medicina. María José Báguena Cervellera en *IyC*, junio de 2020.



MEDIOAMBIENTE

LOS FACTORES ECOLÓGICOS *en las* EPIDEMIAS

¿CÓMO HA INFLUIDO EN LA SALUD HUMANA NUESTRA RELACIÓN CON LA NATURALEZA A LO LARGO DE LA HISTORIA?

Jaume Terradas

INVESTIGACIÓN Y CIENCIA

Jaume Terradas es catedrático emérito de ecología de la Universidad Autónoma de Barcelona. Fue el promotor y primer director del Centro de Investigación Ecológica e Investigaciones Forestales (CREAF), hoy centro de excelencia Severo Ochoa, y ha desempeñado numerosos cargos en organismos científicos y de gestión relacionados con la ecología terrestre y la educación ambiental.



LAS ENFERMEDADES INFECCIOSAS, CAUSANTES DE EPIDEMIAS Y PLAGAS EN HUMANOS, animales y plantas, han existido siempre. Historiadores, escritores, pintores y cineastas han dejado constancia de los estragos de las epidemias, sobre todo de los de la peste bubónica, que en el siglo XIV redujo la población europea por lo menos en un tercio, o la gripe española de 1918, que causó más muertos que la Primera Guerra Mundial, que terminaba ese mismo año.

Según la OMS, una cuarta parte del total de nuestras enfermedades son infecciosas. Todas están provocadas por más de 1400 especies patógenas conocidas, entre ellas virus, bacterias, protozoos, helmintos y priones. El 61 por ciento son zoonóticas, es decir, han saltado de los animales a los humanos. Y de estas, el 75 por ciento son emergentes: son totalmente nuevas, o existen desde hace tiempo pero se hallan hoy en expansión. La más reciente, la responsable de la pandemia de COVID-19, probablemente tiene su origen en una especie asiática de murciélago. Otras más antiguas, como la tuberculosis, el sarampión o la viruela, también son zoonosis y nos llegaron de animales domesticados hace 10.000 años, aunque hoy se transmiten entre personas (si bien la viruela está erradicada). Muchas otras las causan patógenos transmitidos por vectores animales (mosquitos, chinches, garrapatas, pulgas de las ratas, etcétera). Entre ellas destaca la malaria, provocada por un parásito que transmiten ciertos mosquitos y que causa entre 400.000 y 600.000 muertes al año.

Las enfermedades zoonóticas han estado muy influidas por los cambios ambientales, que afectan a los animales y a su interacción con los humanos. Nuestros contactos con la fauna salvaje han aumentado mucho, y con ellos el riesgo de nuevas zoonosis. Las epidemias aparecen asociadas a cambios en los ecosistemas y migraciones de humanos, animales y vegetales, con sus patógenos, y, a su vez, causan notables y complejos cambios ecológicos y socioeconómicos y han contribuido al colapso de sociedades enteras. Estas las han achacado a castigos divinos o a sabotajes y las han combatido mediante medidas de aislamiento e higiene, la mejora en el conocimiento y la producción de vacunas y fármacos. Un vistazo rápido a la historia nos demuestra cómo la salud de las plantas, los animales y los humanos, junto con la organización de nuestra sociedad, han estado enlazadas en una misma trama a lo largo de los siglos.

Las sociedades cazadoras-recolectoras primitivas se sentían parte de la naturaleza, como los animales, las plantas, el agua, las rocas o los «espíritus» que inventaban para explicar el mundo. Pero cuando, 10.000 años atrás, se inició la domesticación de plantas y animales, los humanos creyeron establecer una relación directa con los espíritus o dioses y vieron al resto

EN SÍNTESIS

La mayoría de las enfermedades infecciosas responsables de epidemias graves las producen patógenos que tienen su origen en animales. Su propagación ha sido favorecida por la ocupación y la explotación humanas del entorno, que han desestabilizado los ecosistemas y el hábitat de los animales.

La historia nos demuestra cómo la salud de las plantas, los animales y los humanos, junto con la organización de nuestra sociedad, han estado enlazadas en una misma trama a lo largo de los siglos.

La comprensión de la existencia de este vínculo ha dado lugar a la noción actual de «Un mundo, una salud», una aproximación holística promulgada por científicos y organizaciones de salud pública y animal para que se diseñen investigaciones, políticas y leyes que ayuden a prevenir epidemias y plagas.



CON LA AYUDA DE MÁQUINAS, los humanos invadimos espacios que aún permanecían inalterados, como esta pluvisilva en Tailandia. Entramos así en contacto con especies silvestres portadoras de millones de patógenos desconocidos, sobre todo virus, lo que aumenta enormemente el riesgo de aparición de nuevas enfermedades zoonóticas.

de la realidad como algo que usar. Agricultores y pastores se infectaron con los patógenos de los animales domesticados. Con el tiempo, adquirieron resistencia a algunos de ellos.

La agricultura llevó a la sedentarización y a tener reservas alimentarias, aunque ello conllevó una dieta menos variada que tuvo efectos negativos en la salud por déficits de proteínas y micronutrientes. La relativa seguridad de las reservas permitió que parte de la población se dedicara a tareas no agrícolas, aumentó la población y aparecieron ciudades donde se practicaban oficios cada vez más diversos. Sin embargo, la producción de los cultivos no era siempre fiable, y podía resultar insuficiente para la creciente población. Hubo intercambios comerciales entre sociedades, y algunas empezaron a desear las tierras de otras. Se crearon, con uso de la fuerza, reinos e imperios. Al desplazarse entre ecosistemas, por el comercio o la guerra, los viajeros llevaban consigo a sus patógenos y, a su vez, se contagiaban con los ajenos.

La historia de las epidemias y el imperialismo ha sido relatada magníficamente por Alfred W. Crosby en la obra *Imperialismo ecológico*. Los cruzados sufrieron en Oriente Medio enfermedades poco frecuentes en Europa, y sabemos de las epidemias que los europeos llevaron a América, Oceanía y África entre los siglos xvi y xix. Los amerindios murieron como moscas por las enfermedades europeas y los europeos llevaron al continente esclavos negros, secuestrados y maltratados, cuyos descendientes aún padecen el racismo. La vida media de un marinero en un barco esclavista era de dos años, debido a la malaria, la fiebre amarilla y otras causas. Mientras amplias regiones africanas se despoblaban, apunta Crosby, los descendientes de los esclavos africanos se expandieron en la América cálida y húmeda, donde las poblaciones indígenas se habían reducido mucho a causa de la viruela y otras enfermedades. Ello llevó a la mezcla racial que observamos hoy en día.

Al mismo tiempo que se producían migraciones y colonizaciones, se alteraban la composición y la estructura de los ecosistemas invadidos. Un 40 por ciento de las hierbas de los pastos norteamericanos son europeas, introducidas por los colonos y sus rebaños. Se cultivó donde nunca se había hecho y se talaron bosques para tener pastos o cultivos, lo que a menudo provocaba una pérdida de la fertilidad y la erosión del suelo. La ocupación de deltas y llanos aluviales y la creación de embalses y regadíos propagaron enfermedades cuyos vectores eran mosquitos. Todas estas perturbaciones se han perpetuado e intensificado a lo largo de los siglos.

Un ejemplo ilustrativo de la estrecha interconexión entre la salud de los animales, de los ecosistemas y de las personas es

GETTY IMAGES/PLACEBO365/ISTOCK

Las epidemias más mortíferas de los siglos XIX-XXI

AÑO	ENFERMEDAD	MUERTOS
1846-60	Cólera en Rusia	1.000.000
1855-60	Peste bubónica (pandemia)	>12.000.000
1863-75	Cólera en Oriente Medio	600.000
1870-75	Viruela en Europa	>500.000
1899-1923	Cólera en Europa, África y Asia	>800.000
1896-1906	Tripanosomiasis en el Congo	500.000
1889-90	Gripe (pandemia)	1.000.000
1915-26	Encefalitis letárgica (pandemia)	1.500.000
1918-19	Gripe «española» (pandemia)	>50.000.000
1918-22	Tifus en Rusia	2.500.000
1957-58	Gripe asiática (pandemia)	1.000.000-4.000.000
1968-70	Gripe de Hong-Kong (pandemia)	1.000.000-4.000.000
Pandemias actuales		
1981-	Sida	>35.000.000
2019-	COVID19	>1.000.000
	Malaria	400.000-600.000*
	Tuberculosis	1.500.000*
	Gripe estacional	300.000-650.000*

*muertos al año

EN LOS DOS ÚLTIMOS SIGLOS hemos sido golpeados por enfermedades infecciosas que han causado una gran mortalidad. Nuestra vulnerabilidad ha aumentado con la explosión demográfica, las alteraciones del entorno y la intensificación del transporte y, pese a la mejora de los conocimientos en medicina, biología y ecología, han surgido nuevos patógenos y han evolucionado variedades resistentes de otros ya conocidos.

la expansión de la peste bovina en el Serengueti, en el África oriental, a finales del siglo xix, que ha sido bien descrita por Anthony R. E. Sinclair, de la Universidad de la Columbia Británica, y Michael Norton-Griffith, del Centro de Investigación de la Propiedad y el Medioambiente (PERC, por sus siglas en inglés), en Montana, EE.UU. El origen de la enfermedad suele atribuirse a los rebaños rusos procedentes del Mar Negro que llevó el Ejército del General Gordon a Jartum en 1884, aunque también pudieron ser los de las tropas italianas que invadieron Etiopía en 1989. La plaga provocó un 95 por ciento de mortalidad entre las reses domésticas y, como consecuencia, una gran hambruna entre los masáis, dos terceras partes los cuales fallecieron. Pero, además, la peste se extendió entre la fauna salvaje y causó una fuerte reducción de las poblaciones de ñus, búfalos y jirafas, que dejaron de alimentarse de las plantas leñosas. Estas invadieron la sabana y ofrecieron un ambiente propicio para la propagación de la mosca tsé-tsé, un vector de la tripanosomiasis. La plaga repercutió, pues, en la ecología de la sabana, en la ganadería, en la agricultura y en las sociedades humanas que dependían de estas actividades, y generó otra epidemia, la tripanosomiasis.

Las enfermedades que han afectado a las plantas han tenido también grandes repercusiones sociales. Un pulgón americano, la filoxera (*Daktulosphaira vitifoliae*), devastó las viñas francesas hasta 1870. Al aumentar la demanda de caldos españoles, se expandieron las viñas en nuestro país, pero al final llegó aquí también la plaga y muchos campesinos arruinados migraron a las ciudades, donde se convirtieron en mano de obra para la industrialización. La hambruna irlandesa de 1845 a 1850 fue desencadenada por el hongo *Phytophtora infestans*, que ataca a la patata, un monocultivo que alimentaba a los 8 millones de irlandeses. Los ingleses se habían repartido las mejores tierras y habían dictado leyes que forzaban la venta a Inglaterra de la carne y otros productos. El resultado fue un millón de muertos y un millón de emigrantes a Estados Unidos. Los ingleses asistieron —muchos con satisfacción— al drama de los irlandeses, pobres y la mayoría analfabetos, y convirtieron los campos abandonados en pastos para producir más carne.

La segunda revolución agrícola y la industrialización marcaron un gran paso en la transformación del entorno. Los regadíos se expandieron, la gente del campo se desplazó a las ciudades y hubo un aumento enorme del transporte horizontal (automóvil, ferrocarril, navegación a vapor, aviación). Esa transformación repercutió en la salud humana. La contaminación de fábricas y motores hizo insalubre el aire de las ciudades, y enfermedades como la tuberculosis causaban mucha mortalidad de personas jóvenes. También el cólera atacaba a las poblaciones urbanas. Sus brotes en Londres eran atribuidos a «miasmas» hasta que se aceptó la idea del médico John Snow de que había una «materia mórbida» en el agua del Támesis y de algunas fuentes. Cuando Robert Koch aisló el patógeno responsable, *Vibrium cholerae*, Snow llevaba casi 30 años muerto, pero su estudio sobre la distribución de la infección fundó la epidemiología.

La importancia de la higiene se evidenció con el descubrimiento de los gérmenes, que repercutió en la gestión del agua potable y los alimentos y en las prácticas médicas. Se construyeron alcantarillas, hubo grandes avances médicos, con el desarrollo de las primeras vacunas y luego los antibióticos [*véase* «El retorno de las epidemias», por Maryn McKenna *en este mismo número*]. Se redujo así la mortalidad infantil, lo que impulsó la demografía: en los últimos 75 años, la población mundial se ha triplicado. Además, la población urbana ha pasado de ser de menos del 30 por ciento a casi el 80 por ciento. La población total tiende a estabilizarse, pero puede alcanzar aún 9600 millones hacia 2050 y quizás 11.000 millones en el 2100, un crecimiento que se producirá sobre todo en las ciudades. En una población que crece tanto y tiende a vivir hacinada aumenta el riesgo de epidemias: según Kate E. Jones, de la Sociedad Zoológica de Londres, entre 1940 y 2004 han aparecido unas 300 zoonosis nuevas o variedades resistentes de enfermedades conocidas.

Pero además del hacinamiento, las nuevas actividades en el entorno y la invasión humana de ambientes con abundante fauna salvaje favorecen también la aparición de estas enfermedades. Las ciudades ocupan solo un 2 por ciento de las tierras emergidas del planeta, pero necesitan recursos de superficies muy superiores. Para satisfacer esa demanda, los humanos penetramos en todos los territorios. La explotación de recursos de todo tipo, los viajes de negocios, los transportes comerciales o



LOS MERCADOS «HÚMEDOS» ASIÁTICOS son un ejemplo flagrante de las numerosas imprudencias que cometemos los humanos al relacionarnos con los animales silvestres. Animales vivos y muertos se amontonan en jaulas donde, sobre lechos de paja, se mezclan con heces, orina y sangre. Es un ambiente ideal para el contagio entre animales y, también, de las personas que los manipulan y consumen.

GETTY IMAGES/XXCHENG/ISTOCK

el turismo llevan nuestra actividad a los lugares más remotos, incluidos el Polo Norte, la Antártida y la Estación Espacial Internacional. El avance de campesinos, ganaderos y mineros sobre las selvas tropicales en Sudamérica, África, China, Indonesia, Filipinas o Nueva Guinea destruye ambientes salvajes y pone a los humanos en contacto con especies nuevas, lo que genera riesgos de zoonosis.

El riesgo de enfermedades humanas es especialmente alto en las zonas de frontera entre los ecosistemas naturales y las zonas urbanas. Según los trabajos del entomólogo Felix P. Amerasinghe y sus colaboradores, en el contacto entre bosques y áreas urbanas de las regiones tropicales se propagan la malaria, el dengue y la fiebre amarilla; entre bosques y cultivos hay riesgo de propagación de fiebres hemorrágicas; entre marismas y cultivos son más probables la esquistosomiasis, la filariasis linfática y la encefalitis del Japón. La leishmaniasis y la enfermedad de Chagas se dan en zonas forestales y tierras áridas, y el cólera, en zonas urbanas próximas al litoral o a ríos y lagos. El virus del Nilo occidental y la enfermedad de Lyme se propagan en zonas urbanas y suburbanas de Europa y Norteamérica.

Entre 1940 y 2004 han aparecido unas 300 zoonosis nuevas o variedades resistentes de enfermedades conocidas

El hecho de que las especies silvestres suponen una fuente de patógenos podría hacer pensar que una biodiversidad elevada aumenta el riesgo de zoonosis. Sin embargo, Serge Morand, de la Universidad de Montpellier, y sus colaboradores han demostrado que donde se han producido más zoonosis es en regiones donde hay más especies en riesgo de extinción y mayor pérdida de superficie forestal, es decir, en zonas fuertemente alteradas. Más recientemente, Rory Gibb, del Colegio Universitario de Londres, y su equipo han ofrecido nuevas pruebas en este sentido: han hallado que no solo es más probable que las especies de fauna que se multiplican en los entornos transformados por los humanos (sobre todo roedores, murciélagos y aves paseriformes) actúen como vectores de patógenos, sino también que alberguen en su cuerpo una mayor variedad de ellos, algunos nocivos para nuestra especie. Por consiguiente, la conservación de la naturaleza y de la biodiversidad podría ser un seguro contra brotes epidémicos. No obstante, se necesitan nuevas investigaciones para poder integrar los objetivos de gestión de la biodiversidad y de mejora de la salud humana.

Hay otros factores derivados de las actividades humanas que pueden

favorecer la propagación de enfermedades. El cambio climático, unido a los desplazamientos de personas y el comercio internacional, puede extender enfermedades tropicales a zonas hoy templadas. Un ejemplo lo hallamos en las tres especies del género *Aedes* que han llegado en los últimos años a España procedentes de regiones tropicales: *A. aegypti*, *A. albopictus* (mosquito tigre) y *A. japonicus*. Estos mosquitos son vectores de la fiebre amarilla, la malaria, el mal de Mayaro, la fiebre de Zika, la fiebre del Nilo occidental, el dengue y el chikunguña. Los afectados por dichas enfermedades en Europa corresponden, en su mayoría, a casos importados: personas procedentes de zonas endémicas que cuando llegan no propagan a otras la enfermedad. Pero en algunas ocasiones, gracias a la presencia de los mosquitos vectores, se han transmitido puntualmente dentro del continente y han provocado pequeños brotes. Ha habido casos autóctonos de chikunguña desde 2007 en Italia y en Francia, y de dengue, desde 2010 en Madeira, Croacia, Francia y España; y este pasado verano se ha producido un brote de fiebre del Nilo en Sevilla. Aunque por ahora la transmisión autóctona de estas enfermedades queda restringida a determinadas zonas y momentos, no puede descartarse que en un futuro, sobre todo con el agravamiento del calentamiento global, se propaguen con mayor facilidad.

Por último, cabe destacar el modo en que los problemas de nutrición y contaminación ambiental hacen aumentar la vulnerabilidad de las personas a las enfermedades infecciosas. Nuestra salud requiere muy diversos nutrientes en una proporción adecuada. Sin embargo, aunque la producción del sistema alimentario mundial es suficiente, aún hay cerca de 1000 millones de personas con déficits en micronutrientes, 800 millones con una dieta baja en proteínas o energía y una cifra similar con una dieta excesiva. La falta de agua potable (por escasez o por la presencia de contaminantes químicos o biológicos) es un problema mayor para 2000 millones de personas. En la comida, el agua y el aire hay muchas sustancias que no deberían estar, incluidos los microplásticos, los policlorobifenilos (PCB), las dioxinas y el DDT de los plaguicidas. Muchos actúan como disruptores endocrinos que alteran la resistencia a las infecciones y otras enfermedades. El cambio climático influye también en la cantidad y la calidad del agua y en la intensidad y la frecuencia de los episodios meteorológicos extremos (como sequías o lluvias torrenciales), lo que altera la distribución geográfica de los cultivos y repercute, a escala global, en la disponibilidad de alimentos.

En los últimos decenios se ha observado un aumento de las enfermedades infecciosas emergentes que han causado epidemias. Las enfermedades emergentes son aquellas cuya incidencia o área de distribución aumenta (como la tuberculosis y la enfermedad de Lyme, o los virus del Nilo occidental y de Nipah); las que han evolucionado (las nuevas variantes de gripe o las malarias resistentes a los medicamentos); o las totalmente nuevas (virus de Hendra, del Ébola, el SARS o la COVID-19). Según la OMS, en los últimos 35 años se han detectado unas 30 enfermedades nuevas.

Numerosas enfermedades emergentes son causadas por virus que, al pasar a un nuevo huésped, evolucionan, por lo que es casi imposible tener vacunas o fármacos para combatirlas desde su aparición. Así ha sucedido con el VIH, el virus del Ébola, el de Nipah, los hantavirus, los recientes virus de la gripe (el H5N1 o el H7N9) y los coronavirus. Bastan muy pocas mutaciones para que los virus gripales pasen de las aves a los mamíferos.

Un caso particular de enfermedad emergente fue la encefalopatía espongiforme bovina (más conocida como enfermedad de las vacas locas), cuyos primeros casos se detectaron en el ganado bovino del Reino Unido en 1986, y que después se transmitió a humanos a través del consumo de su carne. La enfermedad la produce un prion (un tipo peculiar de proteína) que surgió en las vacas a cuya dieta se añadieron residuos de matadero que contenían tejidos de vacuno —un alimento singular para animales herbívoros, dicho sea de paso.

LA OCUPACIÓN HUMANA de zonas próximas a los bosques tropicales y subtropicales, unida al calentamiento global, están ayudando a la expansión de especies de mosquitos que son portadoras de patógenos, como *Plasmodium falciparum*. Este parásito, responsable de la malaria, sigue causando medio millón de muertes y más de 200 millones de infecciones al año. La foto está tomada en Brasil, donde el avance humano acelerado sobre las selvas genera un aumento del riesgo.

GETTY IMAGES/JOA_SOUZA/ISTOCK

El SARS (síndrome agudo respiratorio agudo) lo produce un coronavirus que, como el SARS-CoV-2 (el responsable de la COVID-19) o el virus de la gripe de los años 1970, apareció en los mercados de animales vivos de la China y provocó una epidemia en 2003. El MERS (síndrome respiratorio de Oriente Medio) lo produce otro coronavirus y apareció en Arabia Saudí en 2012, con una letalidad del 30 por ciento.

En 2018, se registraron en el mundo 228 millones de casos de malaria (provocada por un protozoo, *Plasmodium falciparum*), de los cuales el 93 por ciento viven en África y el 67 por ciento son niños de menos de cinco años. El cambio global, el conjunto de transformaciones a las que está sometido nuestro planeta (la fragmentación de los bosques, la expansión de los monocultivos y del riego, el uso de productos tóxicos, el ascenso de las temperaturas y los episodios meteorológicos extremos), reduce la eficacia de los depredadores de mosquitos y favorece la propagación de la malaria, para la que no hay vacuna. Algunas de las medidas con las que puede paliarse dicha propagación se basan en la gestión ambiental y la lucha biológica. Los setos, los bosques galería (los que crecen a lo largo de los ríos o alrededor de las zonas húmedas) o los árboles dispersos en zonas de cultivo mantienen estables las poblaciones de depredadores de los vectores, y en las pequeñas lagunas de aguas limpias pueden vivir peces que comen larvas de mosquitos. Fue con medidas de este tipo, sobre todo, como se extirpó el paludismo en España en 1964 (aunque aún haya casos importados).

Cada vez más se ha ido comprendiendo que nuestra salud depende de la de los sistemas ecológicos, tanto de los naturales como de los antropógenos (agroecosistemas, ecosistemas urbanos, etcétera), y que su simplificación excesiva facilita la expansión de plagas y patógenos infecciosos.

El concepto «Un mundo, una salud», propuesto inicialmente por la Sociedad para la Conservación de la Vida Silvestre con el apoyo de otras entidades de salud pública y animal (entre ellas, la OMS, la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, y la Organización Mundial de Sanidad Animal), nació precisamente de la comprensión de que nuestra salud está íntimamente ligada a la de los ecosistemas que sostienen la vida en el mundo, o sea, a la de la red de relaciones entre personas, animales, plantas y microorganismos. Esta noción se define como una aproximación holística a la prevención de epidemias y epizootias (el equivalente de las epidemias en el mundo animal): mantener la integridad de los ecosistemas beneficia a la humanidad, a nuestros animales y a la biodiversidad.

Bajo la premisa de «Un mundo, una salud», un grupo de expertos estableció en setiembre de 2004 los Principios de Manhattan. En el preámbulo se dice que los brotes epidémicos recientes muestran que la comprensión amplia de la salud y la enfermedad exige una aproximación que concilie la salud de humanos, animales domésticos y vida salvaje. Para ganar la batalla a las enfermedades del siglo XXI y mantener la integridad biológica de la Tierra para las futuras generaciones, se requieren aproximaciones interdisciplinares e intersectoriales a la prevención, vigilancia, monitoreo, control y mitigación de epidemias, así como a la conservación ambiental.

La ciencia de la salud de la vida salvaje es esencial para estos fines, que demandan acciones de largo alcance que consideren las complejas interacciones entre especies. Las alteraciones en los ecosistemas se vinculan a variaciones en las pautas de emergencia y propagación de enfermedades. Hay que integrar la conservación de la biodiversidad con las necesidades de salud humana y de los animales domésticos. Hay que reducir la demanda de animales vivos y regular su comercio internacional y el de carne y productos de pesca para reducir los movimientos de especies, la transmisión de enfermedades entre especies, y el desarrollo de nuevas relaciones entre patógeno y huésped. Resulta esencial aumentar la inversión en infraestructuras para la salud humana y animal, y en la vigilancia, la información y la coordinación entre agencias, instituciones y laboratorios farmacéuticos, así como en la educación y la concienciación de la ciudadanía.

La defensa de la salud de los ecosistemas no solo exige la preservación de espacios naturales de especial interés. Hay que reducir la deforestación y la penetración humana en medios salvajes, el consumo de energía y las emisiones, y el uso excesivo de abonos y plaguicidas. Hay que cambiar a una economía circular que reduzca los residuos, remodelar la vida urbana hacia vías sostenibles, con menor huella ecológica, y buscar soluciones de gestión basadas en la naturaleza, desde perspectivas multidisciplinares y con la mirada puesta en objetivos a corto y largo plazo. Cabe insistir en que las epidemias tienen potencial para desbaratar organizaciones sociales complejas y que son, por consiguiente, una amenaza muy real ahora y en el futuro, como lo han sido siempre. La pandemia actual es solo un aviso.

PARA SABER MÁS

Serengeti: Dynamics of an ecosystem. Anthony R. E. Sinclair y Michael Norton-Griffith. The Chicago University Press, 1984.

Global trends in emerging infectious diseases. Kate E. Jones et al. en *Nature*, vol. 451, págs. 990–993, febrero de 2008.

Bats, coronaviruses, and deforestation: Toward the emergence of novel infectious diseases? Aneta Afelt1, Roger Frutos y Christian Devaux en *Frontiers in Microbiology*, vol. 9, art. n.º 702, abril de 2018.

Links between ecological integrity, emerging infectious diseases and other aspects of human health: An overview of the literature. Tom D. Evans et al. Informe técnico de la Sociedad para la Conservación de la Vida Silvestre, abril de 2020.

Contagio: La evolución de las pandemias. David Quammen. Debate, 2020.

EN NUESTRO ARCHIVO

Prevención de pandemias. Nathan Wolfe en *IyC*, junio de 2009.

Cómo evitar una nueva epidemia. Nicholas A. Robinson y Christian Walzer, en *IyC*, mayo de 2020.

Perseguir a los coronavirus. Jane Qiu en *IyC*, junio de 2020.

Pandemias: Claves para la prevención. VV.AA. Colección *Especial* de *IyC*.

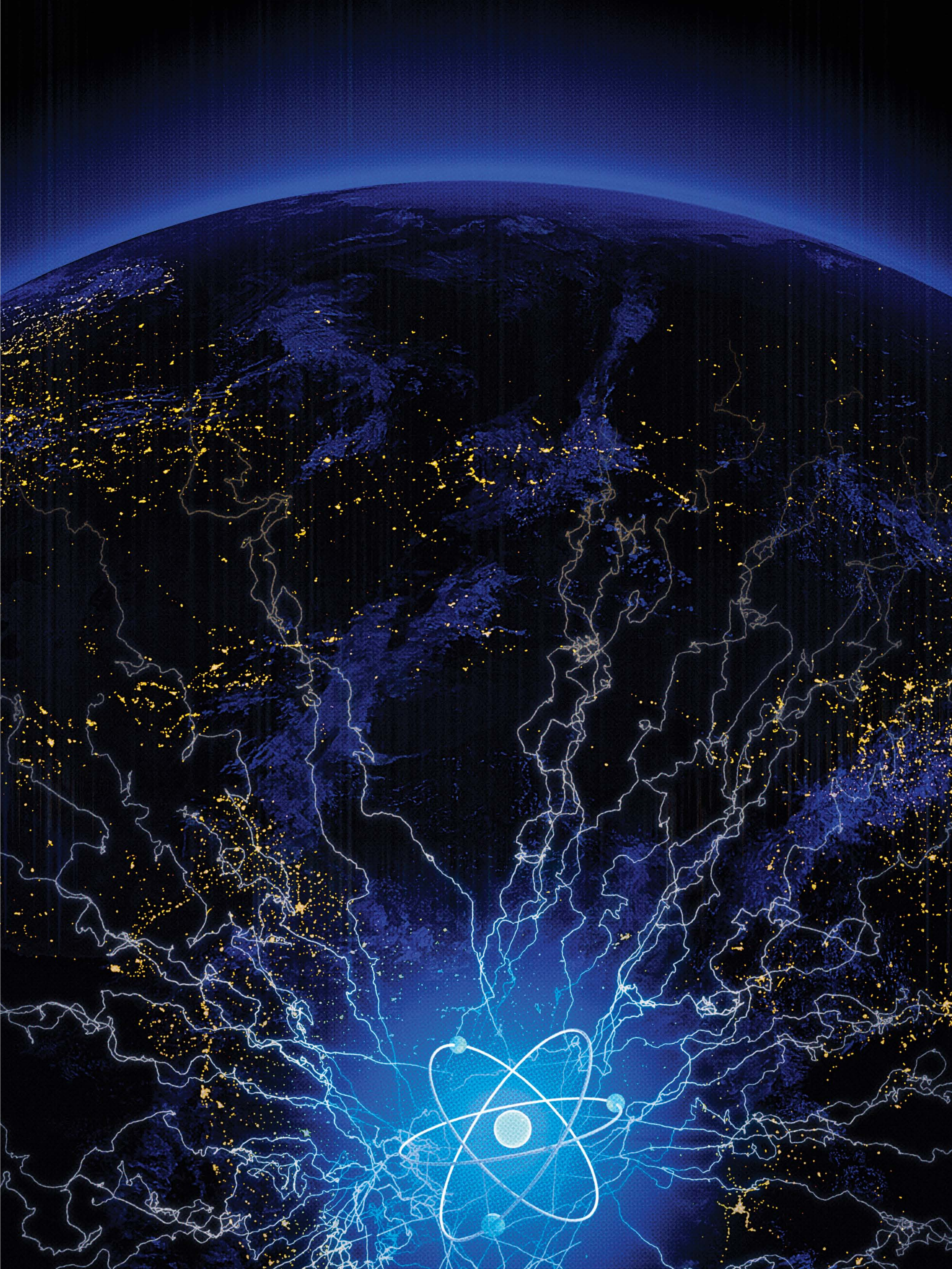
TECNOLOGÍA

LAS TECNOLOGÍAS QUE HAN TRANSFORMADO NUESTRA SOCIEDAD

LOS AVANCES BASADOS EN LA TRANSFERENCIA DE MATERIA Y ENERGÍA HAN SERVIDO PARA DEMOCRATIZAR LA INFORMACIÓN

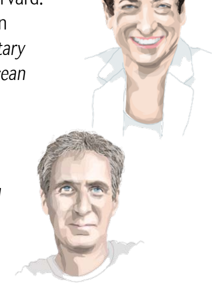
Naomi Oreskes y Erik M. Conway

Ilustración de Tavis Coburn



Naomi Oreskes es profesora de historia de la ciencia y de ciencias planetarias y de la Tierra en la Universidad Harvard. Sus dos últimos libros son *Why trust science?* (Princeton University Press, 2019) y *Science on a mission: How military funding shaped what we do and don't know about the ocean* (University of Chicago Press, 2020).

Erik M. Conway es profesor visitante de historia en el Instituto Tecnológico de California y autor de *Exploration and engineering: The Jet Propulsion Laboratory and the quest for Mars* (Johns Hopkins University Press, 2015).



A LOS CIENTÍFICOS LES RESULTA OBVIO QUE SU LABOR REPORTA BENEFICIOS A LA humanidad, gracias a los adelantos tecnológicos que traen consigo los descubrimientos. Y a los historiadores les resulta obvio que la relación entre ciencia y tecnología es mucho más compleja y menos lineal de lo que tiende a pensar la gente. Antes del siglo XIX, la mayor parte de los inventos e innovaciones eran fruto de la tradición artesanal entre personas que no se dedicaban a la ciencia y solían desconocer los desarrollos científicos pertinentes. Así surgieron la brújula, la pólvora, la imprenta, el cronómetro, la desmotadora, la máquina de vapor o la rueda hidráulica, entre otros muchos ejemplos.

La situación cambió hacia finales del siglo XIX: las tradiciones artesanales pasaron a conformar una «tecnología» que guardaba estrecha relación con la ciencia, y los científicos empezaron a mostrar más interés por aplicar las teorías a problemas prácticos, como ilustra la comisión que designó el Congreso de Estados Unidos en la década de 1870 para investigar las explosiones de las calderas de vapor.

Sin embargo, los tecnólogos solían trabajar en paralelo con la ciencia de su tiempo, más que de forma secuencial. Estos expertos (que pronto pasarían a ser conocidos como ingenieros) formaban una comunidad diferenciada, con sus propias metas, valores, expectativas y metodologías, y sus logros no podían entenderse simplemente como ciencia aplicada. La conexión entre el conocimiento científico y el progreso tecnológico a menudo era sorprendentemente endeble, incluso a principios del siglo XX. Por ejemplo, la aviación despegó antes de que se desarrollara una teoría de la sustentación: los científicos aseguraban que era imposible elevar máquinas «más pesadas que el aire», y aun así los aviones volaban.

Si nos fijamos en los últimos doscientos años, la manipulación de la materia y la energía ha ocupado un lugar central tanto en el progreso científico como en el tecnológico. Las innovaciones tecnocientíficas algunas veces han satisfecho las expectativas y otras no. De entre los principales avances, hubo tres que en verdad nos cambiaron la vida —probablemente para mejor—, mientras que otros dos resultaron mucho menos transcendentes de lo que se esperaba. Y apenas se vislumbró una de las principales repercusiones que apreciamos ahora en retrospectiva: que mover materia y energía acabaría llevándonos a transferir información e ideas.

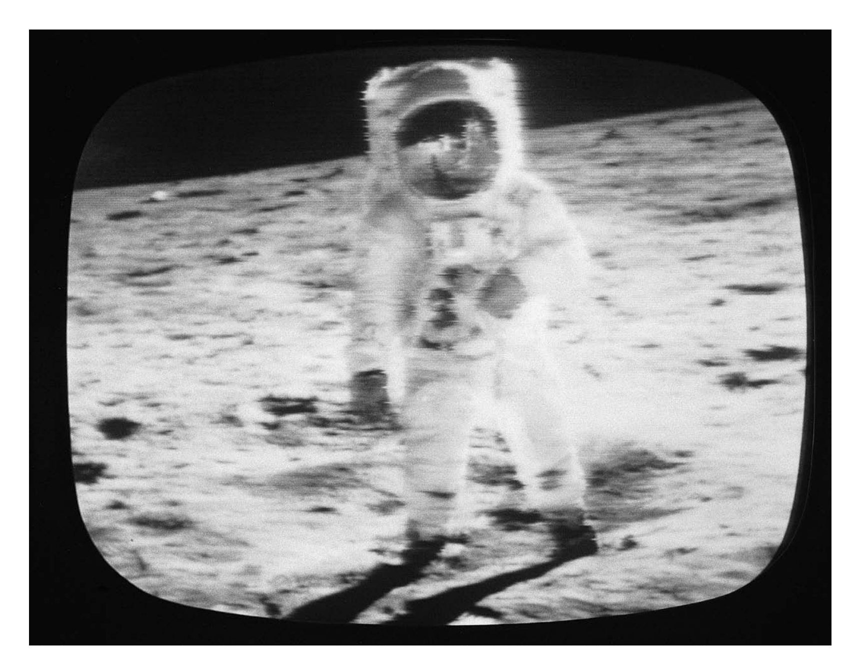
Un buen ejemplo de una tecnología con base científica que nos cambió la vida es la electricidad. Benjamin Franklin es célebre por haberse dado cuenta de que los relámpagos son descargas eléctricas en la atmósfera y por haber demostrado en el siglo XVIII el efecto protector de los pararrayos [*véase* «La ciencia de Benjamin Franklin», por José Manuel Sánchez Ron; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, agosto de 2019]. No obstante, los principales

EN SÍNTESIS

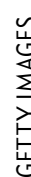
Algunos avances tecnológicos, como la electricidad, las telecomunicaciones o la computación, nos han cambiado la vida. Otros, como la energía nuclear o los vuelos espaciales tripulados, no han cumplido las expectativas.

Todas esas innovaciones se basan en el movimiento de materia y energía, pero en última instancia han servido para impulsar la transmisión de información e ideas.

Para bien o para mal, la información ilimitada está transformando nuestra sociedad, al difuminar las fronteras entre lo público y lo privado, creadores y consumidores, o profanos y expertos.



LA TELEVISIÓN llegó a los hogares a tiempo para retransmitir la llegada a la Luna.



orden y limpieza en el hogar más que para ahorrarles trabajo a las mujeres, pero no cabe duda de que modificaron nuestro estilo de vida.

Uno de los cambios más relevantes y duraderos tuvo que ver con la información y las ideas. La electricidad hizo posible la cámara de cine y el florecimiento del séptimo arte. La primera proyección pública de una película (que mostraba a trabajadores saliendo de una fábrica al final de su turno) se llevó a cabo en París en 1895, por medio de un dispositivo inspirado en el quinetoscopio eléctrico de Thomas Edison; en pocos años, ya se había desarrollado una industria cinematográfica comercial en Europa y EE.UU. Hoy vemos el cine como un entretenimiento —debido sobre todo a la aparición de la industria del espectáculo y a la repercusión que ha alcanzado Hollywood—, pero a principios del siglo xx muchas películas, si no la mayoría, eran documentales y noticiarios. Estos últimos, habituales en los cines, se convirtieron en una importante fuente de información sobre acontecimientos nacionales

avances científicos en nuestra comprensión de la electricidad llegaron más adelante, cuando Michael Faraday y James Clerk Maxwell determinaron que se trataba de un flujo de electrones y que podía entenderse en el contexto más amplio del electromagnetismo. Faraday mostró que la electricidad y el magnetismo son dos caras de la misma moneda: el movimiento de cargas crea un campo magnético, y el movimiento de un imán induce una corriente eléctrica en un conductor. Este hecho, recogido en las ecuaciones de Maxwell (un modelo matemático de la electricidad, el magnetismo y la luz), sentó las bases para la invención de la dinamo, la generación de electricidad para uso industrial y doméstico, y las telecomunicaciones: el telégrafo, el teléfono, la radio y la televisión [*véase* «El camino hacia la electrodinámica de Maxwell», por José Manuel Sánchez Ron; Investigación y Ciencia, julio de 2020].

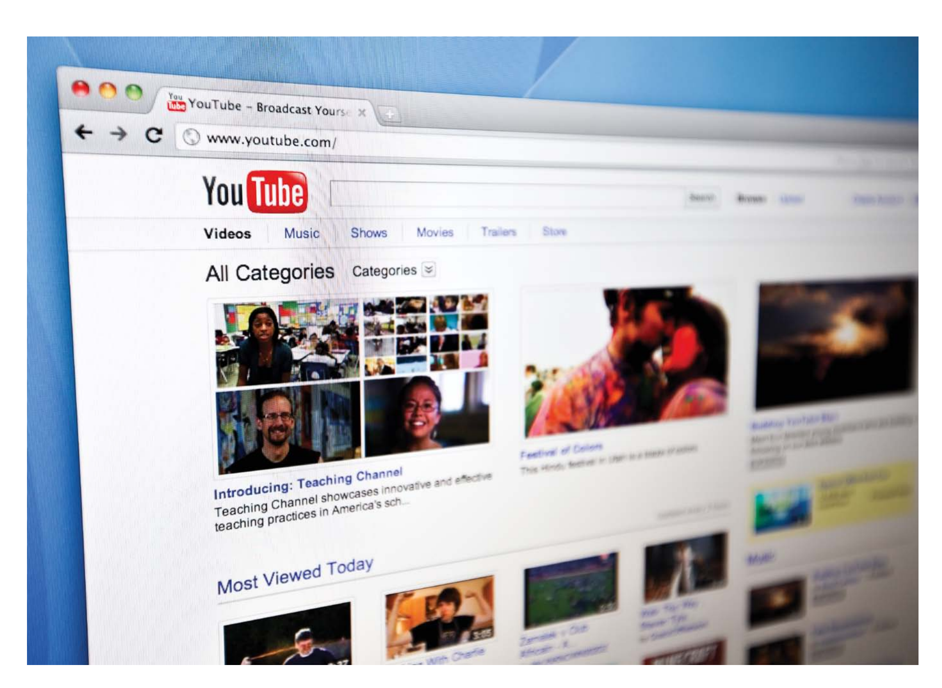
El tamaño de las fábricas aumentó de manera drástica gracias a la electricidad. Hasta entonces, la mayoría de industrias funcionaban con agua, lo que obligaba a situarlas cerca de los ríos, por lo general en angostos valles fluviales donde no sobraba el espacio. Pero la electricidad permitió construir plantas en cualquier lugar, de cualquier tamaño y provistas de iluminación, de modo que podían funcionar día y noche. Eso favoreció la producción en serie y, con ella, el desarrollo de la sociedad de consumo.

La electricidad también transformó la vida cotidiana: impulsó el metro, los tranvías y los trenes de cercanías, lo que permitió que los trabajadores se desplazaran en gran número y las ciudades se expandieran, y abrió la posibilidad de vivir en las afueras. La presencia de luz en los hogares aumentó el tiempo disponible para la lectura, la costura y otras actividades. El entretenimiento floreció en una variedad de formas, desde los espectáculos de luces «electrizantes» de la Exposición Universal de San Luis, en 1904, hasta el cine y la radio. En las viviendas pronto aparecieron neveras, tostadoras, calentadores de agua, lavadoras y planchas eléctricas. En su premiado libro de 1983 *More work for mother*, Ruth Schwartz Cowan sostiene que estos electrodomésticos sirvieron para aumentar las expectativas de

y mundiales. También constituían una fuente de propaganda y desinformación, como en una película de finales de la década de 1890 con imágenes ficticias del caso Dreyfus (un escándalo político francés con tintes antisemitas, donde se acusó de alta traición a un oficial judío del ejército) o un falso metraje de la batalla de las Lomas de San Juan, durante la guerra hispano-estadounidense de 1898.

La información impulsó el auge de la radio y la televisión. En la década de 1880, Heinrich Hertz demostró que las ondas de radio eran una forma de radiación electromagnética, como predecía la teoría de Maxwell [*véase* «Heinrich Hertz», por Manuel García Doncel; Investigación y Ciencia, enero de 1994]. Y en la de 1890, el físico indio Jagadish Chandra Bose realizó un experimento en el que empleó microondas para detonar una carga de pólvora y hacer sonar una campana, probando que la radiación podía viajar sin cables. Estos aportes científicos pusieron los cimientos de las telecomunicaciones modernas y, en 1899, Guglielmo Marconi envió la primera señal inalámbrica a través del canal de la Mancha. Los tecnofideístas (personas que depositan su fe en la tecnología) proclamaron que la radio conduciría a la paz mundial, al poner en contacto a personas de todo el mundo. Sin embargo, hubo que recorrer un camino relativamente largo desde las transmisiones de Marconi hasta la radio que conocemos hoy en día: los primeros programas no se emitieron hasta la década de 1920. Entretanto, la radio no evitó la Gran Guerra de 1914-1918, más tarde rebautizada como Primera Guerra Mundial.

A principios del siglo xx la radio tenía poca demanda, más allá del ejército y los entusiastas. A fin de conseguir que la gente comprara aparatos de radio, las emisoras tuvieron que crear contenidos; para ello recurrieron a patrocinadores, lo que a su vez contribuyó al desarrollo de la publicidad, la mercadotecnia de masas y la cultura de consumo. Entre las décadas de 1920 y 1940, las radios se asentaron en los hogares estadounidenses; los programas radiofónicos competían con los periódicos y a menudo los reemplazaban como principal fuente de información. La



LA RED ha desdibujado la línea que separa a creadores y consumidores de información, una transformación cuyas consecuencias políticas y culturales aún estamos empezando a descubrir.

radio no trajo la paz mundial, pero sí aportó a nuestras vidas noticias, música, teatro y discursos presidenciales.

La historia de la televisión no fue muy distinta: había que generar contenidos para introducir la tecnología en los hogares. En EE.UU., los patrocinadores comerciales produjeron muchos de los primeros programas, como *Texaco star theater* y *General Electric theater*. Las cadenas de televisión también transmitían eventos como los partidos de béisbol y, con el tiempo, empezaron a crear contenidos originales, sobre todo noticiarios. Pese a la escasa calidad de buena parte de la parrilla (o tal vez gracias a ella), la televisión alcanzó una enorme popularidad. Si bien su fundamento científico giraba en torno al movimiento de materia y energía, su expresión tecnológica tenía que ver con la transmisión de información, entretenimiento e ideas.

La Segunda Guerra Mundial volvió a desgarrar el mundo, y las tecnologías con base científica jugaron un papel esencial. Casi todos los historiadores coinciden en que la investigación operativa, el descifrado de códigos, el radar, el sónar y la espoleta de proximidad fueron más importantes para la victoria aliada que la bomba atómica, aunque esta acaparase toda la atención. El secretario de Guerra de EE.UU. Henry Stimson vendió la idea de que la bomba había derrotado a Japón, evitando que el país se embarcara en una costosa invasión terrestre y salvando millones de vidas americanas. Ahora sabemos que ese relato fue una invención de posguerra para prevenir las críticas sobre el uso de la bomba, que mató a 200.000 civiles.

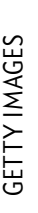
Los líderes americanos proclamaron oportunamente que la segunda mitad del siglo xx constituiría una «era atómica», en la que disfrutaríamos de aviones, trenes, barcos e incluso coches atómicos. En 1958, la compañía Ford construyó una maqueta del Nucleon, un automóvil que sería impulsado por el vapor producido en un microrreactor nuclear. (Huelga decir que el proyecto nunca llegó a buen puerto, pero la maqueta se conserva en el Museo Henry Ford, en Dearborn, Michigan.)

El programa Átomos para la Paz del presidente Dwight Eisenhower buscaba fomentar la energía nuclear civil en Estados Unidos y en países en vías de desarrollo de todo el mundo. Los hogares estadounidenses disfrutarían de una electricidad «tan barata que no harían falta contadores».

Las promesas de la energía nuclear nunca se materializaron. En Estados Unidos, la Marina construyó una nueva flota de submarinos nucleares y cambió los motores de sus portaviones (aunque no los del resto de naves de superficie), y el Gobierno fabricó un carguero con propulsión nuclear a modo de ejemplo. Pero incluso los reactores de menor tamaño resultaban demasiado caros o peligrosos para casi cualquier propósito civil. Alentadas por el Gobierno de EE.UU., las compañías eléctricas empezaron a desarrollar capacidad de generación nuclear en las décadas de 1950 y 1960. Para 1979, el país ya contaba con 72 reactores operativos, la mayoría en la costa este y el Medio Oeste. Sin embargo, incluso antes del terrible accidente que tendría lugar ese mismo año en la central nuclear de Three Mile Island, la demanda de nuevos reactores estaba cayendo debido a los elevados costes de inversión y construcción, y a la creciente oposición pública. En los cinco años posteriores al accidente, se cancelaron más de 50 proyectos y otros requirieron costosas modificaciones. Y la preocupación aumentó en 1986, tras el desastre de Chernóbil en la antigua Unión Soviética. Hoy en día, EE.UU. genera el 20 por ciento de su electricidad en centrales nucleares, un porcentaje significativo pero muy alejado de lo que los promotores de la energía nuclear habían vaticinado en la década de 1950.

Mientras algunos expertos se referían al siglo xx como la era atómica, otros insistían en que estábamos ante la era espacial. Los niños estadounidenses de mediados de siglo crecieron viendo series de ciencia ficción que giraban en torno al sueño de la exploración interplanetaria e intergaláctica, leyendo cómics protagonizados por superhéroes de otros planetas y escuchando discos con canciones sobre el milagro de los viajes espaciales. Sus referentes eran Alan Shepard y John Glenn, los primeros americanos en ir al espacio y en orbitar alrededor de la Tierra, respectivamente. Algunos de sus padres llegaron a reservar plaza en el vuelo a la Luna que prometió la aerolínea Pan American; y Stanley Kubrick mostró una travesía espacial en avión en su película *2001: Una odisea del espacio*, de 1968. El mensaje era claro: a principios del siglo xxi surcaríamos el espacio exterior de forma habitual.

Los principios físicos necesarios para viajar al espacio se conocían desde los tiempos de Galileo y Newton, y la historia está llena de visionarios que advirtieron la posibilidad de hacerlo en las leyes del movimiento; la irrupción de los cohetes en el siglo xx convirtió esa perspectiva en una realidad. Con frecuencia se considera a Robert Goddard el «padre de la astronáutica



moderna», pero fueron los alemanes, liderados por el científico nazi Wernher von Braun, quienes construyeron el primer cohete viable del mundo: el misil V-2. Poco después de la guerra, un programa paralelo desarrollado en el Laboratorio de Propulsión a Chorro y financiado por el Ejército estadounidense produjo otro gran misil balístico. Como parte de la Operación Paperclip, EE.UU. reclutó discretamente a von Braun y su equipo para acelerar un trabajo que, entre otras cosas, dio lugar al Centro de Vuelos Espaciales Marshall de la NASA.

Ese ingente esfuerzo científico y de ingeniería, espoleado por el nacionalismo y los fondos federales, culminó con el aterrizaje en la Luna y el retorno a casa de los astronautas estadounidenses, pero no se tradujo en misiones tripuladas rutinarias, ni mucho menos vacaciones en el espacio. A pesar del incesante entusiasmo y (en los últimos tiempos) la considerable inversión privada, los viajes espaciales han sido básicamente un fiasco. No obstante, los mismos cohetes capaces de lanzar naves tripuladas pusieron satélites artificiales en órbita alrededor de la Tierra, lo que transformó profundamente nuestra capacidad de captar y transmitir información.

Actualmente, las telecomunicaciones vía satélite nos permiten enviar información a todo el mundo de manera casi instantánea y con un coste mínimo. También podemos estudiar nuestro planeta desde las alturas, lo que ha reportado importantes avances en los pronósticos meteorológicos, la comprensión del clima, la cuantificación de los cambios en los ecosistemas y las poblaciones humanas, el análisis de recursos hídricos, y (gracias al GPS) la localización y rastreo de personas. La ironía de la ciencia espacial es que su principal beneficio ha sido permitirnos conocer en tiempo real lo que ocurre aquí en la Tierra. Como la radio y la televisión, el espacio se ha convertido en un medio para transferir información.

La tecnología computacional experimentó una evolución similar. Los ordenadores nacieron con el objetivo de sustituir a las personas (por lo general, mujeres) que efectuaban cálculos laboriosos, pero en la actualidad constituyen sobre todo un medio para crear, almacenar y consultar «contenidos». Aparecieron con sigilo y acabaron teniendo un impacto mucho mayor del que imaginaban la mayoría de sus pioneros. Muchas veces se atribuyen al presidente de IBM Thomas J. Watson las siguientes palabras, que habría pronunciado en 1943: «Creo que existe mercado para unos cinco ordenadores en todo el mundo».

Los dispositivos de computación mecánicos y electromecánicos llevaban tiempo usándose, pero, durante la Segunda Guerra Mundial, los funcionarios de defensa de EE.UU. buscaron agilizar los cálculos por medio de componentes electrónicos (a la sazón, válvulas termoiónicas o tubos de vacío). El Instituto Tecnológico de Massachusetts desarrolló para la Marina estadounidense la computadora Whirlwind, un simulador de vuelo que respondía en tiempo real. Durante la Guerra Fría, las Fuerzas Aéreas lo adoptaron como base del sistema de defensa SAGE (Entorno Terrestre Semiautomático, por sus siglas en inglés), una red a escala continental de ordenadores, radares, equipos de telecomunicaciones con cables e inalámbricos, e interceptores (pilotados o no) que operó hasta los años 80. El sistema SAGE fue clave para que IBM abandonara las tabuladoras mecánicas en favor de los ordenadores centrales digitales y destapó el potencial de los sistemas de gestión interconectados, automatizados y a gran escala. Su ámbito de acción, por supuesto, era la información (sobre posibles ataques militares).

Los primeros ordenadores centrales eran tan grandes que ocupaban casi una sala entera. Además, resultaban caros y se calentaban mucho, de modo que requerían refrigeración. Parecía el tipo de tecnología que solo podrían permitirse un Gobierno o una gran compañía con sobrados recursos. En la década de 1980, el ordenador personal redibujó por completo ese panorama: de repente, los ordenadores se convirtieron en dispositivos que todas las empresas y muchas personas podían adquirir y usar no solo para realizar cálculos exigentes, sino también para gestionar información.

Ese potencial explotó con la comercialización de Internet. Cuando la Agencia de Proyectos Avanzados del Departamento de Defensa de EE.UU. se propuso desplegar una red digital de comunicaciones segura y resistente a fallos, ya disponía de SAGE como modelo. Pero SAGE, construido sobre un sistema telefónico que empleaba la conmutación mecánica, también representaba aquello que no querían los militares, pues los centros de conmutación centralizados eran muy vulnerables a los ataques. Para «subsistir», un sistema de comunicaciones debía poseer un conjunto de centros, o nodos, interconectados en una red. La solución llegó en la década de 1960, de la mano de un heterogéneo grupo de científicos e ingenieros financiados por el Gobierno estadounidense: la red ARPANET, que en los años 80 condujo a lo que conocemos como Internet.

Cabe esperar que la tecnología siga difuminando las fronteras entre el trabajo y el hogar, entre profesionales y aficionados o entre lo público y lo privado

Junto con su aplicación estrella, la World Wide Web, Internet trajo consigo la formidable cantidad de información que ahora tenemos al alcance de un clic, la cual ha cambiado nuestra forma de vivir y de trabajar, y ha dado origen a sectores completamente nuevos, como las redes sociales, el entretenimiento descargable, las reuniones virtuales, el comercio electrónico, los sitios de citas o los vehículos compartidos. En cierto modo, Internet y la electricidad han transitado caminos opuestos: el sector privado desarrolló la capacidad de generación eléctrica, pero hizo falta que el Gobierno distribuyera el producto. En cambio, el Gobierno creó Internet, pero el sector privado lo llevó a nuestros hogares; he aquí un recordatorio de que las generalizaciones frívolas sobre el progreso tecnológico suelen ser falsas. Además, conviene recordar que alrededor de una cuarta parte de los adultos estadounidenses aún no tienen acceso a Internet de alta velocidad.

¿Cómo es que la electricidad, las telecomunicaciones y la informática tuvieron tanto éxito, pero la energía nuclear y los viajes espaciales tripulados han supuesto una decepción? Hoy parece claro que estos dos últimos avances implicaban una gran dosis de ilusión. Los viajes espaciales estaban conectados con la ciencia ficción, con sueños de valentía y heroicidad que continúan alimentando fantasías acientíficas. Aunque lanzar cohetes y poner satélites en órbita resultó relativamente sencillo, enviar gente al espacio (en especial, durante períodos prolongados) sigue siendo caro y peligroso.

Se suponía que el transbordador espacial de la NASA iba a marcar el comienzo de una era de vuelos espaciales tripulados económicos e incluso rentables. Pero no lo hizo, y hasta el momento nadie ha logrado crear un negocio lucrativo alrededor de ese concepto. A finales de mayo, dos astronautas viajaron a la Estación Espacial Internacional en una nave de la compañía SpaceX, lo cual podría suponer un punto de inflexión, aunque aún es pronto para asegurarlo. La mayoría de empresas espaciales piensan que el camino a la rentabilidad pasa por el turismo, con vuelos suborbitales o hasta hoteles flotantes en el espacio para el esparcimiento a gravedad cero. Puede que algún día disfrutemos de ellos, pero no hay que olvidar que el turismo siempre ha seguido al desarrollo y establecimiento comercial, y no a la inversa.

La energía nuclear también ha resultado muy cara, por el mismo motivo: cuesta mucho mantener a la gente a salvo. La idea de que la electricidad sería tan barata que no harían falta contadores nunca tuvo sentido; esa afirmación se basaba en el hecho de que una mínima cantidad de uranio podía producir una gran cantidad de energía, pero el combustible supone el menor de los costes de la energía nuclear. Los principales gastos son la construcción, los materiales y la mano de obra, y se han mantenido mucho más altos para las centrales nucleares que para otras fuentes de energía, sobre todo debido al esfuerzo adicional necesario para garantizar la seguridad.

En muchas ocasiones, el riesgo actúa como factor de control de la tecnología. Los viajes espaciales y la energía nuclear conllevan niveles de inseguridad que resultan aceptables en contextos militares pero, en general, no en los civiles. Y, por mucho que se empeñen algunos en Silicon Valley, a los inversores de capital riesgo no suele preocuparles el peligro. Los Gobiernos emprenden más que la mayoría de los emprendedores, sobre todo cuando se trata de defenderse de enemigos reales o previstos. Además, ni los viajes espaciales tripulados ni la energía nuclear respondían a una demanda del mercado: ambas tecnologías son fruto de Gobiernos que las deseaban por razones militares, políticas o ideológicas. Podríamos estar tentados de concluir que los Gobiernos deberían mantenerse al margen del negocio tecnológico, pero Internet tampoco surgió en respuesta a las exigencias del mercado: la financió y desarrolló el Gobierno de EE.UU. con fines militares. Una vez que se abrió al uso civil, creció, se transformó y, con el tiempo, nos cambió la vida.

De hecho, el Gobierno desempeñó un papel en el éxito de todas las tecnologías que hemos mencionado. En Estados Unidos, aunque el sector privado llevó la electricidad a las grandes ciudades (Nueva York, Chicago, San Luis), fue la Administración de Electrificación Rural la que se encargó de distribuirla por gran parte del país, ayudando a que la radio, los electrodomésticos, la televisión y las telecomunicaciones pasaran a formar parte de la vida cotidiana. Estas tecnologías se crearon a partir de cuantiosas inversiones privadas, pero fue la «mano oculta» del Gobierno la que posibilitó las transformaciones que traían aparejadas, cuyo valor experimentaron los ciudadanos de maneras a menudo imprevistas.

Estos beneficios inesperados parecen confirmar un famoso dicho atribuido a Niels Bohr, Mark Twain o Yogi Berra: es difícil hacer predicciones, sobre todo acerca del futuro. Los historiadores somos reacios a hacer pronósticos, porque nuestro trabajo nos enseña que las generalizaciones suelen ser inadecuadas, que no hay dos situaciones idénticas y que las expectativas de la gente se han visto frustradas en multitud de ocasiones.

Dicho esto, ya empieza a percibirse un cambio en la tranferencia de la información: la frontera que separa a creadores y consumidores es cada vez más difusa. En el pasado, casi toda la información circulaba en un único sentido, del periódico, la radio o la televisión al lector, el oyente o el espectador. Hoy en día, el flujo es cada vez más bidireccional, algo que estaba entre los principales objetivos de Tim Berners-Lee cuando creó la World Wide Web en 1990. Los consumidores podemos comunicarnos a través de Skype, Zoom y FaceTime; difundir información en Instagram, Facebook y Snapchat, y usar aplicaciones para publicar nuestros propios libros, música y vídeos, todo ello sin levantarnos del sofá.

Para bien o para mal, cabe esperar que sigan difuminándose muchas otras fronteras convencionales: entre el trabajo y el hogar, entre profesionales y aficionados, o entre lo público y lo privado. No nos iremos de vacaciones a Marte en un futuro próximo, pero quizás podamos ver las puestas de sol marcianas a través de una cámara web. IyC

PARA SABER MÁS

More work for mother: The ironies of household technology from the open hearth to the microwave. Ruth Schwartz Cowan. Basic Books, 1985.
Electrifying America: Social meanings of a new technology. David E. Nye. MIT Press, 1992.
The decision to use the atomic bomb. Gar Alperovitz. Vintage Books, 1996.
When computers were women. Jennifer S. Light en *Technology and Culture*, vol. 40, n.º 3, págs. 455-483, julio de 1999.

EN NUESTRO ARCHIVO

Los orígenes de la informática personal. M. Mitchell Waldrop en *IyC*, marzo de 2002.
Larga vida a la Red. Tim Berners-Lee en *IyC*, febrero de 2011.
Aerolíneas espaciales. David H. Freedman en *IyC*, febrero de 2011.
La energía nuclear después de Chernóbil. Frank Von Hippel en *IyC*, abril de 2016.

FILOSOFÍA

LA PREGUNTA *por el* SER HUMANO

CÓMO HAN EVOLUCIONADO LAS IDEAS RELACIONADAS CON LA NATURALEZA HUMANA

Alfredo Marcos

ILUSTRACIONES DE GETTY IMAGES/FRANCESCOCH/ISTOCK



Alfredo Marcos es catedrático de filosofía de la ciencia en la Universidad de Valladolid. Experto en filosofía de la biología y en estudios aristotélicos, actualmente centra su investigación en el concepto filosófico de naturaleza humana.



Ya desde bien niños, los humanos tenemos la extraña manía de preguntar. Del mismo modo que hoy podemos meditar a solas o conversar cabe al fuego, es probable que lo hicieran ya nuestros ancestros más remotos. Nos interesa saber qué es una estrella, qué es una planta o un animal, qué es un número o una palabra. Y nos interesa sobremanera saber qué es un ser humano. De un modo más sistemático y menos espontáneo, la filosofía de todos los tiempos se ha centrado también en la cuestión del ser humano. Según sostiene Immanuel Kant en su *Lógica*, todas las preguntas filosóficas importantes acaban por reducirse a esta: «¿Qué es el hombre?».

El eco de esta pregunta ancestral, inquietantemente simple, resuena en innumerables versiones que inquieren sobre nuestro origen o sobre nuestro lugar en el cosmos, sobre nuestros rasgos o sobre el sentido de nuestra existencia. Para interpretar estas cuestiones y darles respuesta, nos valemos de toda suerte de ayudas, de la experiencia cotidiana, de la conversación, de las tradiciones sapienciales y religiosas, del arte, de la ficción literaria o fílmica, del deporte que tantea nuestros límites; a veces —por desgracia—, también de ideologías y supersticiones.

Con todo, desde comienzos de la modernidad, lo que más ha contribuido a configurar la imagen del ser humano ha sido el desarrollo de la ciencia y de la tecnología. El nacimiento de publicaciones como *Scientific American* (que este año celebra su 175 aniversario), dedicadas a la difusión de este desarrollo, es síntoma de la importancia que las ciencias cobraron para la vida diaria, para la formación de una imagen del mundo y, claro está, para el conocimiento que el ser humano tiene de sí. Hasta en las expresiones culturales más populares del siglo xix encontramos un protagonismo creciente de las tecnociencias. «Hoy las ciencias adelantan que es una barbaridad», podemos escuchar en cualquier representación de *La Verbena de la Paloma*, cuyo estreno data de 1894. Y, por entonces, la palabra *ciencia* ya incluía lo técnico. Prueba de ello es que la revista que se titula como *Scientific* abre su primer número (28 de agosto de 1845) con una noticia ilustrada sobre vagones de ferrocarril mejorados, a la que sigue otra sobre avances en la impresión litográfica.

El surgimiento de la publicación que más tarde (1976) daría lugar a *Investigación y Ciencia* coincide, y no por casualidad, con la eclosión del espíritu moderno. Es efecto y síntoma del mismo. La historia de estos últimos dos siglos ha estado marcada por los ilusionantes adelantos de la ciencia y de la técnica, pero también por las barbaridades que en su nombre o con su ayuda se han perpetrado. Según el historiador Nathaniel Comfort, de la Universidad Johns Hopkins, «algunos de los peores capítulos de la historia son atribuibles al cientificismo, la ideología según la cual la ciencia es el único modo válido de comprender el mundo y solucionar los problemas sociales. Mientras la ciencia ha ampliado y liberado nuestra concepción del ser humano, el cientificismo la ha limitado. [...] A lo largo de los últimos 150 años hemos constatado que tanto la ciencia como el cientificismo han configurado nuestra percepción de la identidad humana».

Hemos viajado desde el momento cenital de una modernidad optimista, inspirada por el positivismo y el espíritu de la Ilustra-

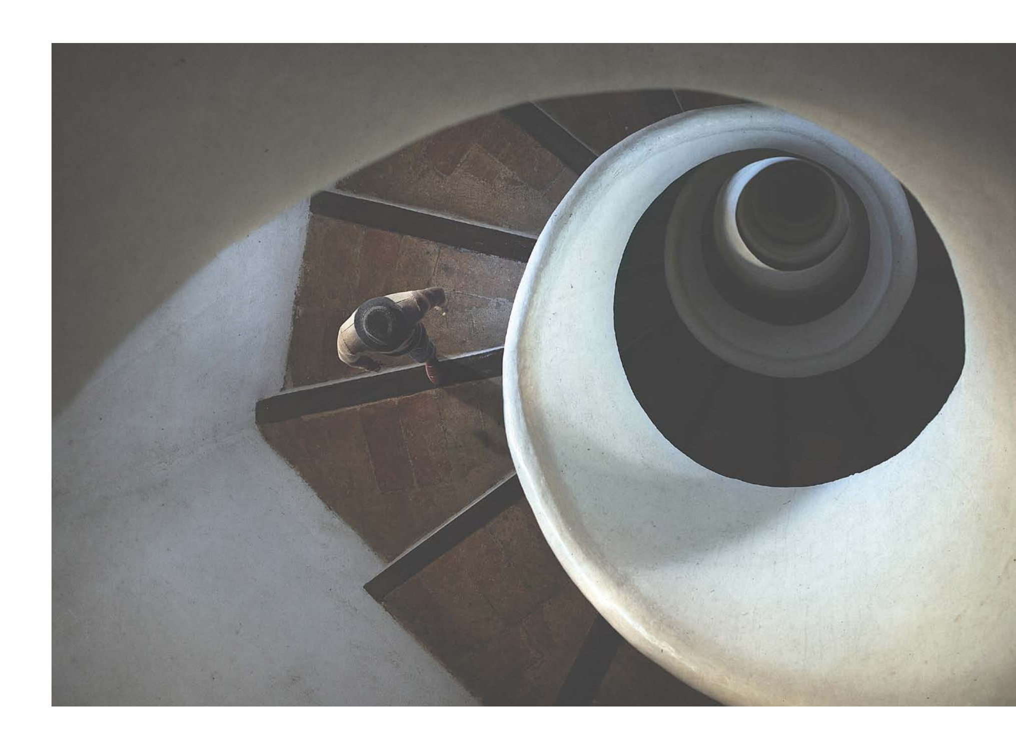
EN SÍNTESIS

Desde mediados del diecinueve, lo que más ha contribuido a configurar nuestra imagen del ser humano ha sido el desarrollo de la ciencia y la tecnología.

Esta concepción de lo que significa ser humano ha viajado del optimismo inicial al descreimiento posmoderno actual, marcado por la fragmentación y el reduccionismo.

Solo una visión que integre también las ciencias humanas, sociales y otras fuentes de sabiduría, y que excluya el pseudoconocimiento ideológico y supersticioso podrá aportar la claridad que precisamos en cuanto a nuestra propia imagen.

ción, dominada por palabras como *mejora*, *avance*, *adelanto* y, por supuesto, *progreso*, hasta el actual estado de descreimiento posmoderno. La trayectoria no ha resultado uniforme. Según el historiador de la ciencia de Harvard Gerard Holton, los momentos de emprendimiento ilustrado se han visto contrapunteados por diversas revueltas románticas. Las fases de avance indudable alternan con otras de decepción y hastío. No es de extrañar que la imagen del ser humano haya resultado también zarandeada durante estos ajetreados años.



Sin embargo, algo ha permanecido: nuestra curiosidad, nuestro interés por lo humano. Han cambiado interpretaciones y respuestas, pero se ha mantenido el propio preguntar. Y la investigación tecnocientífica sigue siendo una de las herramientas más valiosas para abordar nuestra pregunta. Quizás en la estabilidad del propio preguntar se halle una de las claves de nuestro ser. Pongamos, de momento, que somos ese enigmático animal que investiga, medita y conversa sobre su propia naturaleza.



«HOY LAS CIENCIAS ADELANTAN...»

La imagen de lo humano ha evolucionado de manera dramática desde mediados del diecinueve. Es el impulso de lo tecnocientífico lo que ha dinamizado esta reflexión. Permítaseme citar, casi a modo de tormenta de ideas, algunas de las novedades en ciencia y tecnología que más han afectado a nuestra autoimagen.

En 1845 Darwin sopesaba ya en su mente el hecho de la evolución y la hipótesis de la selección natural como explicación del mismo. No obstante, su libro *El origen de las especies* no fue publicado hasta 1859. Tampoco se supo de la genética mendeliana hasta 1865. Las ideas de Darwin convergieron con las de Mendel a principios del siglo xx en la teoría sintética de la evolución, que ha funcionado como la teoría canónica hasta que recientemente se ha propuesto la llamada «extensión» de la teoría sintética. Pocos desarrollos científicos han contribuido más a trazar la imagen del ser humano. Todavía hoy intentamos aquilatar las implicaciones antropológicas del hecho evolutivo y de las distintas teorías de la evolución.

Por otra parte, la genética mendeliana y, sobre todo, la genética molecular, que surgió a mediados del siglo pasado a raíz del descubrimiento de la estructura y función de los ácidos nucleicos, han arrojado luz sobre numerosos aspectos de nuestra naturaleza. En esta línea hay que situar el Proyecto Genoma Humano. Como resultado del mismo, sabemos que, en lo que respecta a la naturaleza humana, no todo está en los genes. En primer lugar, se comprobó que tenemos pocos genes en comparación con los que se esperaban. Junto a ello, se ha visto que la expresión de los genes está modulada por otros genes y por factores epigenéticos, así como por patrones de desarrollo y por factores orgánicos y ambientales. A raíz de todo ello se han puesto en marcha diversas ciencias «ómicas». Coincide la aparición de estas disciplinas con el auge de la llamada evo-devo y con el crecimiento de otras ramas naturalistas de las ciencias de la vida, como la etología y la ecología. Solo una visión madura e integrada de estos desarrollos podrá aportar la claridad que precisamos en cuanto a nuestra propia imagen.

Sin salir de las ciencias de la vida, los avances médicos también contribuyen a formar una idea del ser humano, pues señalan en cada época lo que se tiene por sano y por patológico. Pensemos que Semmelweis propuso una profilaxis elemental en 1847, cuando se probaban los primeros anestésicos de cierta eficacia y no habían llegado aún los descubrimientos de Pasteur sobre asepsia y vacunación, ni los rayos X, ni el primer antibiótico de Flemming, cuando faltaban años para que Ramón y Cajal estudiase las neuronas y estábamos a más de un siglo de la publicación del primer *Manual diagnóstico y estadístico de los trastornos mentales* (DSM, por sus siglas en inglés), por citar tan solo unos pocos hitos paradigmáticos.

Hoy sabemos mucho más sobre el cerebro humano y empezamos a intuir la inmensidad de lo que ignoramos. Tenemos medios diagnósticos, así como tratamientos sofisticados y eficaces, aunque nos veamos de vez en cuando impotentes ante un simple virus. Tratamos con solvencia el dolor, si bien el sufrimiento nos resulta a veces esquivo. Hemos tecnificado a fondo la enfermedad, la muerte y la reproducción humanas, para bien y para mal. Hoy contemplamos entre esperanzados y escépticos las promesas de la medicina regenerativa. Todos estos cambios modulan la idea de ser humano, de su normalidad y salud, de sus capacidades y limitaciones, del significado de las edades por las que vamos pasando. Modifican nuestras expectativas biográficas y sociales.

Si las ciencias de la vida han transformado la idea de lo humano, otro tanto podríamos decir de las ciencias formales y físicas. Con el programa de Hilbert para las matemáticas (1900) calibramos nuestras aspiraciones epistémicas, y con teoremas como el de Gödel, nuestras limitaciones. El desarrollo de varias ramas de la física, como el electromagnetismo, que tanto condiciona las comunicaciones, comienza con el siglo xix bien entrado. Pensemos, asimismo, que las dos grandes teorías físicas que aún dibujan ante nosotros las estructuras y fuerzas básicas del mundo, la teoría de la relatividad y la cuántica, datan de principios del veinte. Dichas teorías afectan a elementos cruciales para la existencia humana, como son el tiempo y la libertad. Y la

cosmología de la gran explosión, de la cual toman los sistemas educativos la imagen del universo, nace en los años veinte del siglo pasado. Es difícil entender sin estos datos la evolución de la idea que nos hacemos sobre nuestra posición en el cosmos; idea que viene condicionada también por la exploración de lo más pequeño, a través de la microscopía electrónica, y de lo más lejano, gracias al perfeccionamiento de los medios telescópicos, todo ello ocurrido en las décadas que nos ocupan.

Esta última precisión nos indica que el conocimiento del mundo que habitamos ha cambiado debido no solo a la teorización, sino también a nuestra actividad exploradora. Hace dos siglos todavía no se conocía el planeta Neptuno ni, en consecuencia, los confines del sistema solar, y mucho menos los de nuestra galaxia. Nada se sabía de otras galaxias (Andrómeda fue identificada en 1923) ni de exoplanetas. Hoy escrutamos a diario el fondo espacial y temporal del universo, a más de doce mil millones de años luz de nosotros.

Incluso los extremos de nuestro pequeño planeta permanecían inexplorados a mitad del diecinueve. La familia humana no había puesto pie sobre la cima del Everest, ni en la fosa de las Marianas, ni en las zonas polares, ni en el satélite que nos acompaña. Tampoco en algunas regiones del interior de los continentes. Durante la época que estamos considerando, el ser humano, por primera vez, cobró una noción verosímil de las dimensiones del mundo y, por contraste, de sus propias dimensiones.

«Todas las preguntas filosóficas importantes acaban por reducirse a esta: "¿Qué es el hombre?"»

—Immanuel Kant

La misma humanidad sufrió durante este tiempo un redimensionamiento demográfico apabullante: redujo la mortalidad infantil, pasó de unos mil a unos siete mil millones de personas, que habitan cada vez más concentradas en megalópolis, pero que visitan con fruición cada rincón del planeta (hasta formar colas, por ejemplo, ante las cumbres del Himalaya). Hoy los humanos son, por término medio, más altos y tienen una esperanza de vida considerablemente mayor que a mediados del siglo XIX.

Todo este caudal de conocimiento sobre nuestro entorno y sobre nuestras bases físico-biológicas nos inserta en la naturaleza, nos naturaliza. Sin embargo, paradójicamente, la innovación tecnológica pone entre nosotros y la naturaleza una densa capa de distanciamiento, nos artificializa —sería interesante saber cuántos olores, colores, sabores o texturas han aparecido recientemente de forma artificial.

Las tecnologías han transformado en este tiempo también el modo de relación entre los humanos [*véase* «Las tecnologías que han transformado nuestra sociedad», por Naomi Oreskes y Erik M. Conway, *en este mismo número*]. A mediados del XIX, la Segunda Revolución Industrial estaba apenas en ciernes, el ferrocarril constituía una novedad con no más de tres lustros de funcionamiento, el primer avión no había surcado los cielos, ni se habían popularizado los vehículos con motor de explosión; el petróleo era, en consecuencia, más una curiosidad geológica que un recurso imprescindible, pues ni siquiera los plásticos que hoy nos rodean estaban en circulación. Se enviaban los primeros telegramas en morse, no había teléfonos (ni fijos ni móviles), ni se transmitía por radio, televisión o Internet. Tampoco dependíamos de la energía eléctrica. Hoy los niños ven la Vía Láctea en documentales televisivos, y no a simple vista en noches despejadas. A cambio, disponen de fotografías del planeta tomadas desde satélites y estaciones espaciales. De hecho, un par de siglos atrás, la fotografía apenas daba sus primeros pasos y la carrera espacial no arrancaría hasta mediado el siglo XX. Hoy no sabríamos vivir al margen de la realidad digital, que unas décadas atrás no existía; dependemos cada día más de la llamada inteligencia artificial, estamos instalados en una esfera de realidad virtual que media en todas nuestras relaciones con el mundo natural y social. Es evidente que todo ello, ocurrido en un breve lapso histórico, ha transformado la vida y la imagen del ser humano.

La más reciente vuelta de tuerca tecnológica consiste en un proyecto *antropotécnico*. Hay quien propone una intervención bio-digital profunda sobre el ser humano, mediante herramientas como la edición genética o los nuevos psicofármacos, para así dirigir y optimizar en lo sucesivo su evolución. También se indaga la posibilidad de poner al humano en simbiosis con los sistemas de inteligencia artificial, o de sustituirlo directamente por estos. De aplicarse, estas antropotecnias que pretenden llevarnos a un estado trans o post-humano cambiarían no solo la imagen, sino la propia ontología humana.

Súmese el hecho de que la mayor parte de las ciencias sociales y humanas han madurado durante los dos últimos siglos, lo cual ha permitido acrecer el conocimiento de nuestra evolución e historia, así como de nuestros rasgos sociales, culturales, lingüísticos, etnológicos, económicos y psicológicos. Para traer algún caso significativo: Freud nació en 1856, y Saussure, un año más tarde; casi todo lo que sabemos sobre la evolución de nuestra especie lo hemos aprendido en las últimas décadas; muchos de los documentos, huellas y restos que atestiguan la historia son accesibles desde hace poco; parte de los Estados y fronteras que hoy conocemos se han conformado en los dos últimos siglos; los estudios sociológicos y económicos han puesto en circulación, desde mediados del siglo XIX, imágenes dispares del ser humano, caricaturizado a veces como *Homo œconomicus*, fabulado otras como «hombre nuevo»; la antropología y la etnología nos han mostrado la proteica diversidad de lo humano, así como los rasgos comunes sobre los cuales se puede edificar la comunidad humana.

Comenzábamos con la pregunta kantiana, «¿qué es el hombre?», pero hoy sabemos, gracias a las ciencias humanas y sociales, que esta cuestión ha de interpretarse también en un sentido extensional que haga justicia a la diversidad de lo humano. Hay que considerar dentro del interrogante a todas las personas, de cualquier etnia, de cualquier edad, niños y viejos, varones y mujeres, por supuesto, más o menos autónomos o dependientes, sanos o enfermos... No preguntamos por un estereotipo idealizado, al estilo del famoso Hombre de Vitrubio. No podemos ya permitirnos una interpretación injustamente sesgada de nuestra pregunta inicial.

DESCENTRAMIENTO, REDUCCIÓN Y FRAGMENTACIÓN



Volvamos ahora con más perspectiva sobre la cuestión. ¿Qué cambios concretos ha causado el desarrollo de la tecnociencia en la imagen que el ser humano tiene de sí mismo? Quizá podríamos llamar *descentramiento* al primero que nos viene a la mente. El antropocentrismo está hoy mal visto. La cosa venía de atrás, de cuando Copérnico puso la Tierra en órbita. Pero se agravó con Darwin, quien nos enseñó nuestros humildes orígenes, y más aún con Freud, quien disipó la idea de un yo consciente dominador de sí. El sujeto humano habría quedado perdido, al decir de Nietzsche, «en algún apartado rincón del universo centelleante», desposeído de su especial conexión con la divinidad y con el sentido de las cosas, disgregado como sujeto en múltiples pulsiones internas. Al descentramiento le sigue de modo natural la desvalorización e incluso disolución de lo humano. Esta narrativa nihilista se ha convertido en un tópico, pero en realidad no viene dictada por la ciencia, sino por una interpretación ideológica de la misma.

Para empezar, el ser humano pre-moderno no solía verse en el mero centro. En *La divina comedia* de Dante, el hombre no habitaba el centro del mundo. Estaba, eso sí, sobre la superficie de la Tierra, en una posición intermedia entre los círculos celestes y los infernales que ocupaban el centro. Para seguir, hasta en un universo inmenso, «desparramado en innumerables sistemas solares», como dice Nietzsche, el ser humano marca un punto de vista, un centro de observación (de momento, no se conoce otro). Se sitúa, además, en franjas centrales de la escala de magnitudes, a medio camino entre lo más pequeño y lo más grande que conocemos.

Cuando se dice que el ser humano es el centro del universo, también se quiere decir a veces que es el objetivo, el fin, aquello a lo que todo se orienta. Así pues, respecto al centro como metáfora de la finalidad, el centro de la diana al que se dirige la flecha (pensemos en la metáfora del arquero, presente en Aristóteles y en Ortega y Gasset), el filósofo americano Thomas Nagel sostiene que las ciencias naturales tendrán que integrar de algún modo los aspectos teleológicos de la realidad, sin negarlos. Además, el debate sigue abierto entre defensores y detractores de las diversas versiones del «principio antrópico». En resumen, ni antes estaba el ser humano tan en el centro de todo, ni ahora está cosmológicamente tan descentrado.

Por su lado, el darwinismo, que ilumina nuestros orígenes, no resuelve todo en cuanto a nuestro ser y sentido. Las teorías de la evolución de estirpe darwinista nos han enseñado mucho sobre el ser humano, pero no podemos responder a todas nuestras cuitas antropológicas y vitales dándole simplemente a la tecla de la selección natural. Esta pretensión desmedida supone, en palabras del neurocientífico británico Raymond Tallis, una forma inflamada e ideológica del darwinismo que él denomina «darwinitis».

Por último, y aunque es cierto que estamos hechos de muchos mimbres, identificables desde un enfoque psicoanalítico, también lo es que podemos tejerlos en la unidad biográfica que constituye cada persona, quizá mediante una educación emocional inteligente.

Junto con la narrativa estereotípica del descentramiento, han aparecido en las décadas de referencia fuertes tendencias reduccionistas y fragmentadoras. «Este libro —anotó la filósofa británica Mary Midgley en su *Science and poetry*— trata sobre la identidad personal, sobre quiénes y qué somos. Trata sobre la unidad de nuestras vidas. Intenta sugerir cómo podemos resistir las modas académicas que actualmente nos fragmentan». Midgley argumenta «contra la manera de pensar que extiende deliberadamente los métodos impersonales, reductivos y atomistas [...] Esta extensión deliberada da la impresión de que algo llamado *ciencia* nos está prohibiendo ser humanos. Pero la ciencia no hace tal cosa».

En estas líneas aparecen varios conceptos clave que marcan la deriva de la imagen humana desde mediados del siglo XIX hasta hoy. Se habla aquí de «métodos reductivos», de «fragmentación» y de «unidad de nuestras vidas». Se insinúa, para cerrar, una tensión, no entre la ciencia y la vida humana, sino entre esta última y una interpretación ideologizada de lo científico. Detengámonos en estas sugerencias.

El método científico, como señala el filósofo alemán Hans-Georg Gadamer, procede por abstracción o limitación. Podemos investigar unos aspectos de la realidad a costa de poner otros entre paréntesis, lo cual no equivale a negar la realidad de estos últimos. Pero una mala intelección de este método puede conducir al reduccionismo. Se puede entender, en función de la ciencia que uno elija, que el ser humano es solo un montón de átomos en interacción, o un conjunto de células arracimadas; que es un mero nodo de la red social o un simple habitante del ecosistema; una gavilla de pulsiones o una desencarnada razón económica. En cada caso, confundimos las legítimas —e imprescindibles— limitaciones metodológicas con la realidad misma, la

metodología con la ontología. De ahí han ido brotando diversas imágenes sesgadas y parciales del ser humano.

Pero, cada vez que levantamos la vista para superar cualquiera de los reduccionismos, nos encontramos con una imagen fragmentada de lo humano. Es como si estuviésemos ante un espejo roto. Podemos fijar la vista en uno solo de sus añicos. Lo que vemos es interesante, pero parcial, solo un aspecto de nuestra realidad humana. En cambio, si miramos al espejo en su conjunto, obtenemos una visión más compleja del ser humano, pero fragmentada, cubista, una visión que no llega a ser nunca *una*. Gran parte de la modernidad se ha inclinado hacia la reducción, mientras que la posmodernidad ha optado decididamente por la fragmentación.

La tendencia a la fragmentación, además, se ha visto reforzada por la progresiva especialización de las tecnociencias. Así, cada fragmento del espejo, a su vez, se fracciona. La especialización es un fenómeno deseable para generar mejor conocimiento. Puede compensarse con enfoques interdisciplinares, pero también puede dar lugar a la ideología que José Ortega y Gasset llamaba *especialismo* y que, a sus ojos, constituye una forma de barbarie que imposibilita una imagen consistente de lo humano.

Hay aún otros factores que favorecen la fragmentación. Son las expectativas desaforadas del cientificismo y los efectos a veces inquietantes de la propia tecnociencia. Las expectativas desmedidas muchas veces se saldan con decepciones, y todo ello contribuye a un descreimiento respecto de la auténtica ciencia, que aporta buen conocimiento a la humanidad, pero no certezas definitivas ni datos exhaustivos. Además, en los años que estamos escrutando, la misma tecnociencia nos ha propiciado, directa o indirectamente, junto con enormes beneficios, severos disgustos en forma, por ejemplo, de ataques o accidentes nucleares, daños ecológicos, nuevas patologías, experimentación ilegítima sobre seres humanos o empleo descuidado de animales, por no mencionar los meros errores y fraudes que desgraciadamente afectan a cualquier empresa humana. Una lectura apresurada de todo ello ha podido engendrar una actitud de desconfianza respecto de la tecnociencia. Tenemos un reciente ejemplo en el fenómeno que llamamos posverdad. Aquí, las fuentes científicas son simplemente reemplazadas por preferencias sentimentales e ideológicas, que imposibilitan un discurso racional común sobre lo humano. De nuevo, y en consecuencia, la imagen del ser humano se rompe en mil pedazos, lo cual dificulta hasta la vida en comunidad de la familia humana.

La oscilación moderna entre dos exageraciones, cientificista la una, anti-científica la otra, produce asimismo una tensión antropológica irresoluble. El ser humano es visto por los cientificistas como pura y solamente natural, sometido a las mismas determinaciones que cualquier otro pedazo de materia, lo cual no se compadece con nuestra experiencia de libertad. Por otro lado, la reacción anti-científica, de corte existencialista, lleva a negar la naturaleza humana, a enfatizar la voluntad y una especie de libertad absoluta del ser humano para hacerse a sí mismo, con olvido, también anti-empírico, de nuestra corporalidad, de nuestras limitaciones y capacidades naturales. La tensión antropológica a la que este dilema nos avoca se salda demasiado a menudo con una nueva y más profunda fragmentación: la imagen dualista del ser humano. Según esta, el humano resulta del fortuito encuentro de un cuerpo, sometido a las leyes de la naturaleza, con una especie de *software* inmaterial —quizás inmortal— que podríamos incluso separar y «subir a la nube».

Ni que decir tiene que el dualismo y cualquier otra forma de fragmentación de la imagen humana generan un malestar cultural y cotidiano parecido al de una patología. Estamos tentados a diagnosticar esta patología con una expresión de Bertrand Russell: «la esquizofrenia del hombre moderno». Y posmoderno, habría que añadir.

LA UNIDAD DE NUESTRAS VIDAS

A la pregunta por lo humano podríamos responder diciendo que el ser humano es un ser que pregunta. Es verdad. Pero es una respuesta demasiado vacía y formal. Sentimos la necesidad de darle carne y hueso a nuestra concepción de lo humano. Para ello acudimos a diversas fuentes; en los últimos dos siglos, principalmente a las de carácter científico. Gracias a estas, nuestro conocimiento de lo humano ha crecido de modo sorprendente, pero quizá no tanto nuestra sabiduría. Necesitamos ahora integrar en una las imágenes que de nosotros arrojan las ciencias formales, naturales, sociales y humanas. Queremos integrar, además, todo ello con lo que nos dicen otras fuentes respetables, desde la experiencia ordinaria y el sentido común, hasta las tradiciones sapienciales y el arte, pero con exclusión del pseudoconocimiento ideológico y supersticioso. Tenemos por delante el reto teórico y práctico de integrar, sin esquizofrenias dualistas, todos los aspectos de nuestra identidad, pues cada uno de nosotros constituye una entidad única e irrepetible, una persona, no una amalgama de componentes. El desarrollo de la ciencia y la innovación tecnológica pueden contribuir decisivamente a esta tarea. IyC

PARA SABER MÁS

Verdad y método. Hans-Georg Gadamer. Editorial Sígueme, 1977.
Science and poetry. Mary Midgley. Routledge, 2002.
Mind and cosmos. Thomas Nagel. Oxford University Press, 2012.
Aping mankind: neuromania, Darwinitis and the misrepresentation of humanity. Raymond Tallis. Routledge, 2014.

EN NUESTRO ARCHIVO

¿Qué nos hace humanos? José Viosca Ros en *MyC*, junio de 2016.
La técnica y el proceso de humanización. José Sanmartín Esplugues en *IyC*, julio de 2017.
Humanos: Por qué somos una especie tan singular. VV.AA. Número monográfico de *IyC*, noviembre de 2018.
Ciencia, cientificismo e identidad humana. Nathaniel Comfort en *IyC*, octubre de 2020.


COVID-19
UN RETO CIENTÍFICO Y SOCIAL

por Marc Boada Ferrer

Marc Boada Ferrer es divulgador científico y experto en ciencia experimental.



El láser ultravioleta de nitrógeno (II)

Rematamos el trabajo iniciado en la primera parte con la construcción de la cámara de descarga y pasamos a la fase de pruebas y ajustes

PULSO DE DESCARGA sobre la pantalla fluorescente. En la imagen se aprecian los dos electrodos entre los que saltan las chispas, así como el inductor sobre la pantalla (para tomar la fotografía se ha sustraído la lámina superior de la cámara de descarga).

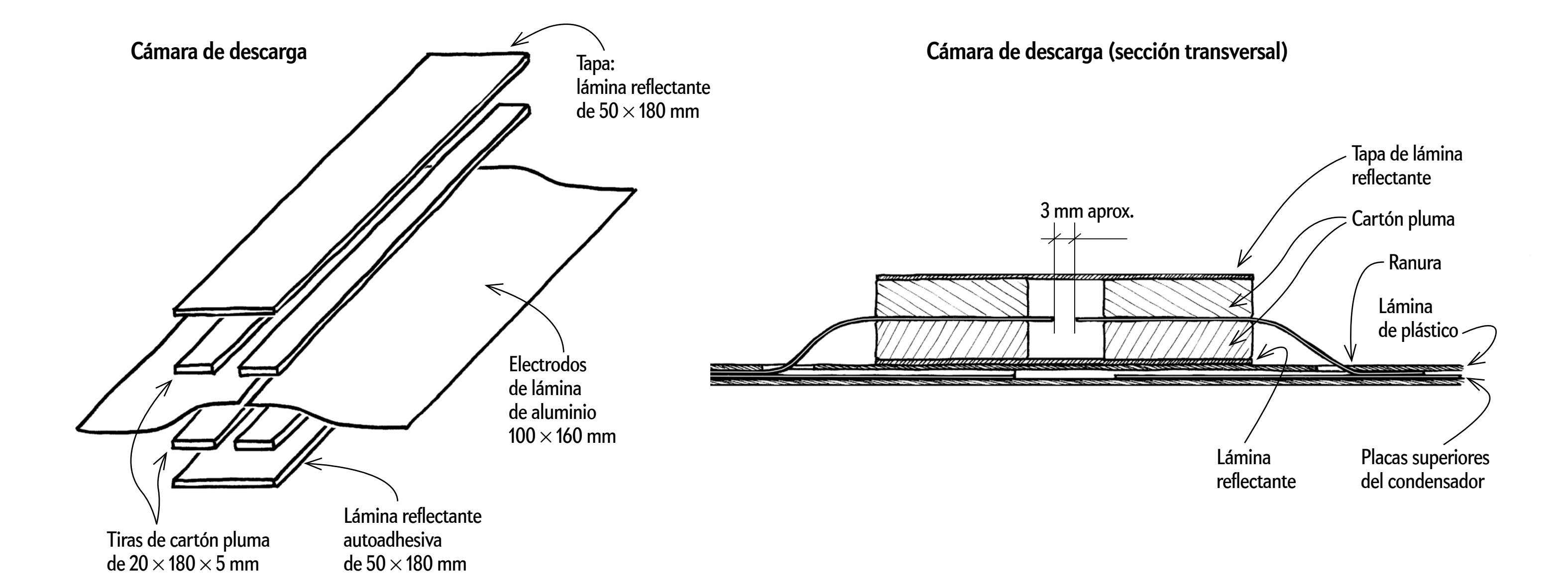
En la entrega anterior [*Investigación y Ciencia*, julio de 2020] habíamos explicado los fundamentos del láser de nitrógeno a presión ambiente y habíamos construido la parte electrónica. Por tanto, a estas alturas disponemos de la fuente de alimentación de alta tensión, los condensadores, el disparador y el inductor. Solo nos resta la cámara de descarga y la pantalla de proyección, siendo la primera la parte más delicada.

La cámara de descarga

La precisión con que construyamos la cámara determinará la calidad óptica de nuestro láser. Esta se monta por capas y, una vez terminada, deberá fijarse perfectamente sobre los condensadores.

Su base puede hacerse con una pieza de plástico reflectante, de las que se usan para reparar provisionalmente los retrovisores de coche. Esta lámina la encontraremos en bazares orientales y goza de amplias aplicaciones para el experimentador aficionado, pues es flexible, muy brillante y autoadhesiva. Una vez localizada, recortemos un retal de 50 × 180 milímetros y, con cinta adhesiva de doble cara, fijemos sobre su cara espejada dos tiras de cartón pluma de 20 × 180 milímetros y 5 milímetros de espesor, separadas entre sí unos 10 milímetros.

Ahora, tal y como muestra el dibujo, coloquemos dos láminas de aluminio de



uso doméstico de 100 × 160 milímetros, las cuales se convertirán en los electrodos de descarga. Entre sus extremos debe quedar un espacio paralelo de unos 3 milímetros. Para garantizar una descarga uniforme en toda su extensión, es especialmente importante que el filo desde el que salta la chispa, el canto, sea perfectamente lineal, sin arrugas ni defectos. Para cortar con precisión la lámina de aluminio necesitaremos un poco de práctica. La colocaremos sobre una superficie algo dura (fórmica, por ejemplo) y presionaremos el aluminio con una regla. Después, con una cuchilla de cúter nueva, muy inclinada y aplicando una presión mínima, lograremos hacer el corte sin problemas.

Para fijar los electrodos en sus posiciones, y a sabiendas de que luego los tendremos que ajustar, optaremos por hacer una especie de pinza algo laxa. En los extremos de las dos tiras de cartón pluma pondremos un poco de masilla adhesiva Blu Tack, y después añadiremos dos tiras más de cartón del mismo tipo y dimensiones, tal y como se ve en la figura. Remataremos la parte superior con otra tira de lámina reflectante que cerrará el conjunto, con la cara espejada mirando hacia abajo. Esta última se aguantará simplemente por efecto de su propio peso.

Con todo a punto, procedamos al montaje. Pongamos el disparador en su sitio, dejando un par de milímetros entre las puntas. Tal y como describimos en nuestro artículo precedente, colocamos el inductor en su posición y lo fijamos con los imanes. Montemos la cámara de descarga justo en el centro del aparato e introduzcamos los electrodos (las láminas de aluminio) en las ranuras del acetato superior. Ajustemos su separación a unos 2 o 3 milímetros y, como decíamos más arriba, asegurémonos de que quedan perfectamente paralelas. Ahora coloquemos la tapa reflectante. Conectemos con unos cables la fuente de alta tensión a las escuadras y activemos la descarga.

El control de las descargas

Si todo va bien, escucharemos un chisporroteo y, acto seguido, el inicio de unas descargas rápidas y ruidosas, tanto en el disparador como entre los electrodos de la cámara de descarga. Observemos esta última: las descargas luminiscentes deben producirse en toda su extensión; de no ser así, separaremos un poco la zona donde son más frecuentes.

Conseguida una descarga uniforme a lo largo de los electrodos, podemos ajustar el disparador. Antes que nada, debemos recordar que nuestro láser produce unos fuertes picos de luz debido a la potente descarga de los condensadores, y que estos quedan a menudo cargados aunque hayamos cortado la alimentación eléctrica. Para prevenir una descarga, lo que podría ser muy peligroso, es extremadamente importante que, una vez desconectada la alimentación eléctrica, neutralizamos la carga residual del condensador cortocircuitándolo con una placa conductora con mango aislante, con la que tocaremos las dos tuercas del disparador (*véase el esquema correspondiente en la primera entrega*).

Ahora separemos unas décimas de milímetro más (equivalentes a una fracción de vuelta) los dos tornillos en punta del disparador y probemos de nuevo. La cadencia de las descargas será más lenta, y el ruido y la luz asociada más intensos. Si separamos solo un poquito más las dos láminas de aluminio de la cavidad de descarga, la intensidad aumentará ligeramente. Así, retocando una y otra vez las distancias entre puntas y electrodos, conseguiremos sacar el máximo de energía del sistema.

A esas alturas las descargas que obtendremos serán como latigazos sonoros y, atención, ópticos, ya que estaremos emitiendo pulsos de luz coherente de pocos nanosegundos de duración y, como mínimo, de algunos kilovatios de potencia. Sin embargo, la luz que emite nuestro láser resulta en su mayor parte invisible, ya que el pico de emisión se produce en el ultravioleta, concretamente a una longitud de onda de 337,1 nanómetros (recordemos que el espectro visible abarca desde los 380 hasta los 750 nanómetros aproximadamente). De aquí se desprenden dos cosas. La primera es que necesitamos protegernos ante esta radiación: nos abstendremos de mirar directamente hacia la descarga y utilizaremos gafas con cristales que filtren el ultravioleta. La segunda es que tendremos que idear algún método para detectar dicha emisión. Lo más práctico será construir una pantalla fluorescente sobre la que proyectar nuestro haz láser. Pero, antes de pasar a esta parte, debemos atender a un pequeño detalle.

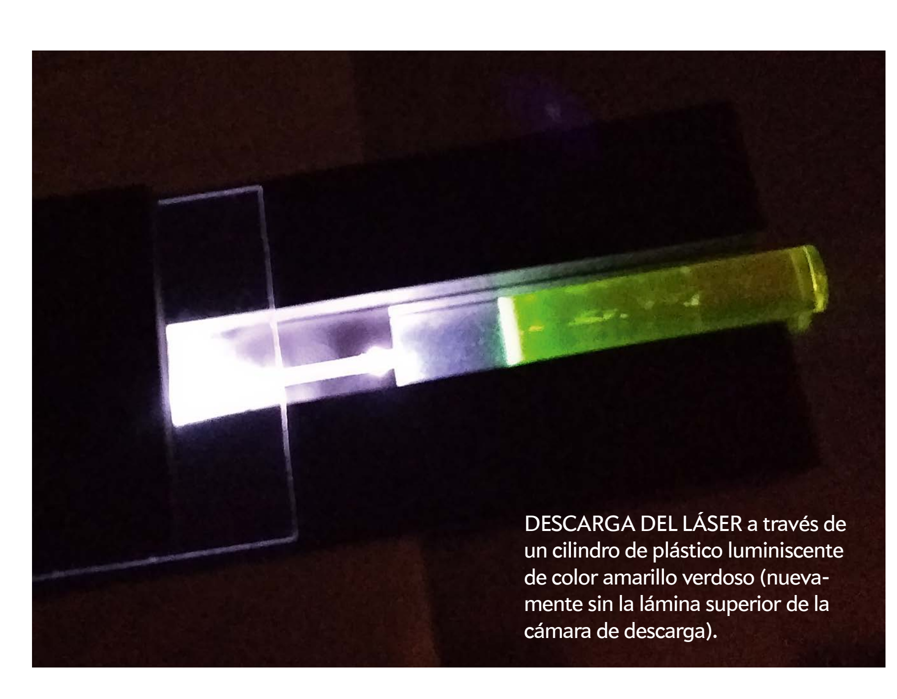
Las chispas del disparador, obviamente, ionizan el aire, por lo que emiten luz en una amplia región del espectro. Esta luz resulta bastante molesta y dificulta la observación de los pulsos láser. Por ello, ya en las primeras versiones de este instrumento, los constructores adoptaban

una solución tan sencilla como instalar el disparador en un tubo de plástico opaco cerrado en ambos extremos. Sin embargo, he podido comprobar que eso no es tan fácil. Las chispas producen algo de ozono, disocian algunas de las moléculas de nitrógeno y, de alguna forma, alteran el ritmo de las descargas. Por todo ello, vale la pena construir una cajita de material aislante y opaco, más bien grande y, atención, con un par de aperturas que garanticen la renovación del aire de su interior. Eliminada así la emisión luminosa del disparador, podemos concentrarnos en observar la emisión ultravioleta de nuestro láser.

La pantalla de proyección

Podemos hacernos unas estupendas pantallas de proyección para el ultravioleta canibalizando el típico rotulador fluorescente de marcar textos, el resaltador comúnmente conocido como «fosforito». No todos rinden igual servicio, ya que, para conseguir ese amarillo resplandeciente, cada marca prepara su propia mezcla. Por tanto, buscaremos el mejor diseccionando distintos marcadores, disolviendo su pigmento en alcohol y pintando con él una hoja de papel bien blanco. Luego, esa hoja teñida, con una o varias capas y ya bien seca, la montaremos sobre una pieza de papel de aluminio y ambos sobre un trozo de cartón pluma con una escuadra por detrás, para que se mantenga vertical. Ahora dispondremos de una pantalla rígida que resplandecerá de forma espectacular bajo la luz ultravioleta y que nos permitirá observar la mancha de luz que proporciona el láser y mejorar aún más sus ajustes. Con un poco de paciencia, ajustaremos aún más el paralelismo de los electrodos y conseguiremos focalizarlo en un área de pocos centímetros cuadrados.

Pero las opciones para observar la emisión ultravioleta del láser no acaban aquí. Podemos llenar un tubo de ensayo o un bote con el alcohol utilizado para lixiviar el pigmento del rotulador y colocarlo a la salida de la cámara de descarga. El haz se hará perfectamente visible mientras atraviesa la solución. También podemos seguir los pasos de otros investigadores y buscar láminas de plástico fluorescentes. Estas son piezas rígidas de metacrilato que se comercializan en varios formatos. Buscando en tiendas de manualidades y bricolaje encontré dos: una del color amarillo brillante típico y otra aún más resplandeciente, de tono anaranjado, con dimensiones 210 × 150 milímetros y de 3 milímetros de espesor. Si cortamos una fina tira, de algunos centímetros de largo y pocos milímetros de sección, y pulimos al máximo sus caras exteriores, dispondremos de una especie de guía de ondas; algo similar a una fibra óptica, solo que dopada con pigmentos fluorescentes capaces de convertir en visible la radiación ultravioleta.


DESCARGA DEL LÁSER a través de un cilindro de plástico luminiscente de color amarillo verdoso (nuevamente sin la lámina superior de la cámara de descarga).

Ajustes y mejoras

Nada hemos dicho hasta ahora del gas que estamos excitando para obtener la descarga. En el modelo original, el gas era nitrógeno puro a una presión de unos 100 milímetros de mercurio. Nosotros, sin embargo, estamos experimentando con la mezcla de gases del aire, entre los que destacan el nitrógeno y el oxígeno. Parte de la gracia de este láser es precisamente que funciona con aire a presión atmosférica. Pero ello hace también que la emisión no sea pura, ya que estamos excitando multitud de moléculas distintas. Además, trabajar a presión atmosférica dificulta la ionización, ya que las descargas en gases se tornan más estables y luminosas a medida que la presión disminuye. Por tanto, el experimentador inquieto puede emprender una senda colateral e investigar opciones creativas para mejorar su láser.

Probemos a poner una simple pajita de refrescos en un extremo de la cámara de descarga mientras tapamos la otra con un cubreobjetos, y aspiremos ligeramente con un tubo de Venturi o una bomba de vacío, por simple que sea. Observaremos interesantes variaciones en la mancha de luz que aparece sobre la pantalla fluorescente. Antes de seguir, aclaremos que los fenómenos que se suceden en la cámara de descarga no son solo los propios de la ionización del gas, sino que a ellos se solapan fenómenos puramente térmicos.

Expliquémonos. Imaginemos por un momento que pudiéramos observar en detalle uno de esos múltiples filamentos luminiscentes que aparecen en el momento de la descarga (*véanse las fotografías*). Ve-

ríamos un pequeño rayo, algo muy parecido a la descarga de una nube de tormenta. Ese pequeño filamento es un plasma de gas a alta temperatura, lo que significa que el gas donde se produce se dilata súbitamente en el momento de la descarga. Precisamente el ruido, el latigazo sonoro que acompaña a la descarga, obedece a esa súbita expansión. En descargas como la que aquí nos ocupa, al estar los electrodos situados horizontalmente, el arco eléctrico tiende a subir arrastrado por el aire caliente. Pero la creación de cierto vacío y la suave renovación del gas cambian ese comportamiento.

Por ejemplo, ajustando la disminución de la presión creada en la cámara de descarga se mejora su focalización. De la misma forma, si inyectamos muy lentamente aire fresco en la cámara de descarga, también mejora la mancha y se regularizan las descargas (recordemos lo que hemos explicado antes sobre la acción química de las chispas en el disparador). Más aún, se sabe que el funcionamiento de estos láseres mejora añadiendo un pequeño porcentaje de helio al nitrógeno. Por una vez estamos de suerte, ya que es relativamente fácil comprar helio en tiendas de materiales para fiestas infantiles. Podemos inyectar con la pajita un suave flujo de este gas y observaremos un nuevo incremento en la luminosidad.

También se ha propuesto la inyección de nitrógeno exento de oxígeno. Pese a que no es difícil conseguir una bombona de nitrógeno, hay que destacar que es especialmente oneroso. Por ello, puede recurrirse a la fijación del oxígeno por oxidación de lana de acero. El proceso es simple: llenamos un largo tubo de cobre con lana de acero y calentamos su parte central mientras hacemos circular un pequeño volumen de aire. Al emerger del tubo, este habrá quedado prácticamente exento de oxígeno, ya que este se habrá combinado con la lana de acero. Gracias a ello, dispondremos de nitrógeno casi puro.

Después de varios ajustes, nuestro instrumento estará a punto. Con el disparador ocultado y la pantalla de proyección en su sitio, podremos ver bellísimas descargas de kilovatios de intensidad, observar y fotografiar fenómenos ultrarrápidos e incluso inducir algunas reacciones fotoquímicas. Aparte de la belleza de las descargas, el láser de nitrógeno es también una herramienta con multitud de aplicaciones industriales y científicas. 

José Manuel Sánchez Ron es miembro de la Real Academia Española y catedrático emérito de historia de la ciencia en el Departamento de Física Teórica de la Universidad Autónoma de Madrid.



HISTORIA DE LA CIENCIA

Linus Pauling: compromiso con la ciencia y la paz

Su visión transdisciplinar iluminó la química y la biología molecular con las ideas de la mecánica cuántica

José Manuel Sánchez Ron

En la historia de la química del siglo xx, Linus Carl Pauling (1901-1994) ocupa una posición de privilegio, por sus contribuciones concretas pero también, acaso más, por mostrar la importancia que el nuevo «instrumento» procedente de la física, la mecánica cuántica, tenía para la química y, asimismo, por llevar sus conocimientos e intereses a la biología, que también enriqueció. Por si fuera poco, fue un hombre que se involucró en algunos de los problemas sociopolíticos que afectaban al mundo. De la notoriedad y distinción que alcanzó tanto en la ciencia como en su activismo social da fe el que obtuvo dos premios Nobel: el de química en 1954 por su investigación sobre la naturaleza del enlace químico y su aplicación a dilucidar la estructura de sustancias complejas, y el de la Paz en 1962.

Linus Pauling

Pauling nació en Portland (Oregón) y estudió ingeniería química en el Colegio Universitario de Agronomía del Estado de Oregón. Completados estos estudios, en 1922 se trasladó al Instituto de Tecnología de California (Caltech), en Pasadena, con el propósito de doctorarse. El Caltech era entonces un centro de excelencia en física, astronomía y químico-física. Allí estaba Gilbert Newton Lewis (1875-1946), personaje destacado en la químico-física mundial, que en 1916 había propuesto una teoría de enlace químico (covalente) basada en electrones compartidos por átomos diferentes. En una institución joven como era el Caltech, aún no excesivamente dividida en compartimentos (departamentos) estancos, existía la posibilidad de relacionarse con otros campos, como sería el caso de la biología, que llegó al Caltech en 1928 de la mano del genético Thomas H. Morgan.

El estilo científico de Pauling fue deudor de la educación que recibió y el ambiente en que se movió en Pasadena. Mezcló consideraciones cuánticas sobre el enlace químico con las propias de la cristalografía y difracción de rayos X, sin olvidar algunas más biológicas. Para él, la biología molecular era «una parte de la química estructural, un campo que estaba comenzando a desarrollarse cuando empecé a trabajar en la determinación de estructuras de cristales mediante difracción de rayos X en el Instituto de Tecnología de California en 1922». Francis Crick, el codescubrior de la estructura del ADN en 1953, resumió la importancia de Pauling para la biología molecular cuando escribió que: «Pauling fue en biología molecular una figura más importante de lo que a veces se cree. No solo hizo algunos descubrimientos clave (por ejemplo, que la anemia falciforme era una enfermedad molecular), sino que tenía la aproximación teórica exacta a estos problemas biológicos. Creía que mucho de lo que quedaba por saber podía explicarse utilizando ideas químicas bien fundadas, en especial la química de las macromoléculas, y que nuestros conocimientos sobre los diversos átomos, especialmente el carbono, y sobre los enlaces que mantienen los átomos juntos [...] serían suficientes para desvelar los misterios de la vida».

El director de tesis de Pauling, Roscoe Gilkey Dickinson, era un especialista en cristalografía de rayos X. Con él Pauling determinó la estructura de algunos cristales complejos, como la molibdenita (MoS_2). Y una vez dominada la técnica, se lanzó

ARCHIVO DEL INSTITUTO SMITHSONIANO, VIA WIKIMEDIA COMMONS


Linus Pauling

en esta dirección: antes de doctorarse en 1925 había publicado, solo o en colaboración, siete artículos sobre estructuras cristalinas.

Química cuántica

En 1926 Pauling obtuvo una beca de la Fundación Guggenheim que utilizó para ampliar estudios en Europa durante un año. Conocedor de las posibilidades de la nueva física cuántica (en el Caltech pudo escuchar las enseñanzas de los físicos europeos Paul Ehrenfest y Arnold Sommerfeld, que visitaron el centro e impartieron cursos sobre diferentes aspectos de la física cuántica), escogió como destino europeo el Instituto de Física dirigido por Sommerfeld en Múnich, al que llegó en abril. Allí permaneció la mayor parte del tiempo pero, al final, en la primavera de 1927, pasó algunas semanas en el Instituto de Física de Niels Bohr en Copenhague. Allí se relacionó sobre todo con Samuel Goudsmit, con quien, como veremos, escribiría posteriormente un libro. De allí se trasladó a Zúrich, donde pasó el verano, aunque no fue con Peter Debye ni con Erwin Schrödinger con quien más se relacionó, sino con dos jóvenes ayudantes, Walter Heitler y Fritz London, quienes a principios de 1927 habían publicado una teoría del enlace covalente, que aplicaron a la más simple de las moléculas, la del hidrógeno. «Inmediatamente», escribió años más tarde Pauling, «comencé a aplicar la teoría de Heitler y London a sistemas más complicados, y en 1928 publiqué un breve artículo sobre la teoría del par de electrones compartidos en el enlace químico [...]». Entonces, desde el otoño de 1927, ya estaba de regreso en el Caltech, donde fue nombrado profesor ayudante de química teórica.

En una carta que escribió a Gilbert N. Lewis el 7 de marzo de 1928 se refería al artículo al que aludía en la cita anterior, dentro del contexto de las aportaciones de Lewis:

Querido Profesor Lewis:

Sin duda habrá visto el reciente artículo de London en el Zeitschrif für Physik *[«Zur Quantentheorie der homoopolaren Valenzzahlen», 1928] y habrá observado que los resultados que deriva de la mecánica cuántica concernientes a compartir electrones son en lo principal equivalentes a las reglas que usted había obtenido previamente. Es, por supuesto, su prerrogativa señalar esto; pero en la creencia de que probablemente no lo hará, me he tomado la libertad de referirme a este hecho en la primera parte de una nota sobre algunos desarrollos de la teoría que he enviado a* Proceedings of the National Academy *(incluyo una copia) [«The shared-electron chemical bond», 1928]. Si esto no recibe su aprobación, haré los cambios que desee. En un artículo más extenso para el* Journal of the American Chemical Society *señalaré con mayor detalle la sustanciación que da la mecánica cuántica a su teoría. Me satisface mucho que en el nuevo modelo atómico los rasgos que resultan del átomo de Lewis se hayan reproducido tanto como los del átomo de Bohr.*

En las clases que he estado impartiendo este año sobre mecánica cuántica con aplicaciones químicas, he revisado detenidamente el trabajo sobre la molécula de hidrógeno y el ion molecular, y he corregido varios errores sustanciales. Además, he realizado los cálculos que proporcionan la interpretación de dos átomos de helio [...].

He traducido la disertación de Goudsmit y, juntos, la estamos ampliando ahora para formar una monografía, «The atomic model and the structure of line spectra», que, creo, aparecerá durante este verano. He trabajado con Goudsmit en Copenhague en problemas espectrales, y he encontrado que un conocimiento de la teoría de los espectros resulta muy útil para atacar el problema que más me interesa: la naturaleza del enlace químico.

El libro con Goudsmit al que se refería Pauling en esta carta vio la luz, pero más tarde de lo que preveía: lo publicó McGraw-Hill en 1930 en la colección dirigida por F. K. Richtmyer *International Series in Physics*. Se tituló, *The structure of line spectra*.

En 1931 Pauling publicó una descripción detallada de la mecánica cuántica del enlace covalente. Estos estudios y trabajos le condujeron a publicar en 1935, en colaboración con Edgar Bright Wilson, una introducción a la mecánica cuántica destinada a químicos: *Introduction to quantum mechanics, with applications to chemistry*. Mucho más importante que este texto fue su célebre tratado de 1939: *The nature of the chemical bond and the structure of molecules and crystals*. El libro estaba dedicado a Gilbert Newton Lewis. Este debió hacer llegar a Pauling su satisfacción por la dedicatoria, y el 20 de agosto de 1939 Linus escribía a Lewis:

Querido Profesor Lewis,

Me hace muy feliz saber que está contento con mi libro, y que piense que es lo suficientemente bueno como para habérselo dedicado. Sabe usted, por supuesto, que le he tenido en mente continuamente mientras lo escribía y que he estado deseando que aceptara mi tratamiento.

Estoy esperando ver el artículo sobre el color que usted y Calvin van a publicar en el número de octubre de Chemical Reviews. *He estado trabajando durante algunos meses en la teoría del color en tintes y hablé de mis resultados preliminares en Chicago. Mencioné brevemente en mi capítulo del libro* Química orgánica *dirigido por Gilman una idea fundamental sobre el color de los tintes, y hace algunos meses pensé en una forma de efectuar cálculos aproximados mecanocuánticos —la dificultad se halla, por supuesto, en encontrar un tratamiento aproximado que sea razonablemente simple y, no obstante, suficientemente bueno como para ser significativo.*

Un detalle interesante, y revelador de que Pauling estaba pensando para la audiencia de su libro no solo en los químicos sino también en los físicos, es que en la carta que envió el 13 de junio a un miembro, W. S. Schaefer, de la editorial que lo había publicado (Cornell University Press), con una lista de personas a las que quería se enviasen ejemplares, aparecían, entre otros, William Bragg, Robert Millikan, Niels Bohr y Werner Heisenberg.

Es difícil, tantos años después, darse cuenta de lo que significó aquel texto para, entre muchos otros, aquellos que pugnaban por desentrañar las estructuras de moléculas biológicas. En un ensayo que escribió poco después del fallecimiento de Pauling, Max Perutz manifestó sobre el particular: «En la Navidad de 1939, una amiga me regaló un vale de compra para libros que

utilicé para adquirir *La naturaleza del enlace químico* de Linus Pauling, que había aparecido poco antes. Ese libro transformó el panorama químico romo de los textos anteriores en un mundo de estructuras tridimensionales [...]. El libro de Pauling reforzó mi convicción, inspirada por J. D. Bernal, sobre la importancia de conocer la estructura tridimensional, y de que jamás se comprendería la célula viva sin conocer las estructuras de las grandes moléculas que la componen [...]. El enfoque creativo de Pauling, su síntesis de la química estructural, teórica y práctica, su capacidad de integrar una amplia gama de observaciones para sustentar sus generalizaciones, así como su prosa ágil, reunió por primera vez los datos llanos de la química en una trama intelectual coherente para mí y para miles de estudiantes».

Pauling y la biología molecular

En 1932, Pauling presentó a la Fundación Rockefeller una propuesta de investigación en química estructural. Aunque pretendía dedicarse sobre todo a estudiar sustancias inorgánicas, señaló la necesidad de determinar también la estructura de moléculas orgánicas. «Este conocimiento,» apuntó, «puede ser de gran importancia para la bioquímica, resultando en la determinación de estructuras de proteínas, hemoglobina y otras sustancias orgánicas complicadas.» La Fundación decidió financiar el proyecto durante dos años. Transcurrido ese período, Pauling supo que la Rockefeller no tenía intención de seguir apoyando el campo de la química inorgánica estructural, pero que recibiría con agrado propuestas de proyectos para investigar sustancias importantes para la biología. Cuando la Fundación impuso sus condiciones, Pauling ya había adquirido el conocimiento suficiente para abordar el estudio de las macromoléculas que aparecen en la materia viva. Posiblemente el fruto más notable fue el que llegó a comienzos de la década de 1950, cuando Pauling publicó una serie de ocho artículos sobre la estructura de las proteínas, el primero de los cuales (escrito en colaboración con Robert Corey y Herman Russell Branson, «The structure of proteins: Two hydrogenbonded helical configurations of the polypeptide chain», *Proceedings of the National Academy of Sciences,* 1951) comenzaba con las siguientes palabras:

Durante los últimos quince años hemos estudiado el problema de la estructura de las proteínas de diversas maneras. Una de estas formas es la completa y precisa determinación de la estructura cristalina de aminoácidos, péptidos y otras sustancias simples relacionadas con las proteínas, para obtener la información sobre las distancias interatómicas, ángulos de enlaces y otros parámetros que permitiese predecir con fiabilidad configuraciones razonables de la cadena de polipéptidos. Ahora hemos utilizado esta información para construir, para la cadena de polipéptidos, dos configuraciones helicoidales con enlaces de hidrógeno; pensamos que es probable que estas configuraciones constituyan una parte importante tanto de la estructura de las proteínas fibrosas y globulares como de las de polipéptidos sintéticos.

La estructura helicoidal que mencionaban es la denominada «hélice α», que, de hecho, se le había ocurrido a Pauling en 1948, estando en Oxford y obligado a permanecer en cama debido a una fuerte gripe (hizo pública su idea el año siguiente, en el Caltech). Entre las virtudes de semejante estructura se encontraba la de que permitía interpretar las fotografías de difracción de rayos X de fibras proteínicas de cabellos, uñas y músculos (esto es, sustancias que contienen proteínas, como la queratina) que otro de los pioneros de la aplicación de las técnicas de difracción de rayos X a sustancias orgánicas, William Thomas Astbury, había obtenido en la Universidad de Leeds, donde era profesor en física de textiles.

A partir de entonces, la estructura helicoidal se puso de moda. Se ha argumentado que la doble hélice del ADN de James Watson y Francis Crick constituye buena muestra de esa influencia, pero ambos realizaron manifestaciones un tanto contradictorias al respecto. Así, Watson, en su célebre libro *The double helix* (1968) recordaba: «Las hélices estaban entonces en el centro del interés del laboratorio [Cavendish], principalmente debido a la hélice α de Pauling». Y unas pocas páginas antes había escrito una frase que hay que insertar en las precedentes: «A los pocos días de mi llegada [al Cavendish], sabía lo que hacer: imitar a Linus Pauling y batirle en su propio juego». [*Véase* «Diálogo con James Watson en el cincuentenario del descubrimiento de la doble hélice», por John Rennie; Investigación y Ciencia, marzo de 2003.]

Los recuerdos de Crick fueron un tanto diferentes: «Se ha dicho que el modelo de Pauling de la hélice α, o su modelo incorrecto del ADN, nos sugirió la idea de que el ADN era una hélice. Nada más lejano de la realidad. Las hélices estaban en el ambiente y había que ser muy obtuso o muy obstinado para no pensar en líneas helicoidales. Lo que Pauling nos enseñó es que la construcción meticulosa y exacta de un modelo podía representar una limitación que, en cualquier caso, la respuesta final debía satisfacer. En algunas ocasiones, esto podía conducir a la estructura correcta, empleando solo un mínimo de pruebas experimentales directas. Esta fue la lección que recibimos y que Rosalind Franklin y Maurice Wilkins no supieron apreciar cuando intentaron descifrar la estructura del ADN».

En lo que se refiere a Pauling, parece claro que consideró que el descubrimiento de la estructura del ADN le debió mucho, y no solo por la hélice α, sino también por haberse aproximado a la idea de «estructuras complementarias» que desempeñan un papel central en los procesos de replicación hereditaria. Así, en uno de sus artículos en los que pasó revista a sus aportaciones, escribió:

Hacia 1948 [y aquí se citaba a sí mismo: L. Pauling, «Molecular architecture and the processes of life; The 21st Sir Jesse Boot Lecture»] fui capaz de escribir sobre el gen: «El mecanismo detallado por medio del cual un gen o una molécula vírica producen réplicas de sí mismas no se conoce todavía. En general, el uso de un gen o de un virus como plantilla conduciría a la formación de una molécula no con idéntica estructura sino con una complementaria. Puede suceder, por supuesto, que una molécula pudiese ser al mismo tiempo idéntica y complementaria con la plantilla en el que es moldeada. Sin embargo, me parece muy poco probable que este caso sea válido en general, excepto de la siguiente manera. Si la estructura que sirve como una plantilla (el gen o la molécula vírica) está formada de, digamos, dos partes, que son ellas mismas complementarias en su estructura, entonces cada una de estas partes puede servir como el molde para la producción de una réplica de la otra parte, y el complejo de dos partes complementarias puede servir por tanto como el molde para la producción de duplicados de él mismo.» Ocho años más tarde, los dos filamentos fueron identificados como polinucleótidos (moléculas de ADN) no en Pasadena, sino en Cambridge, por Watson y Crick, con la ayuda

de Jerry Donohue. Donohue, la única persona a la que Watson y Crick agradecían en su primer artículo, había pasado varios años en el departamento de química del Instituto de Tecnología de California, y sabía mucho más sobre enlaces de hidrógeno y moléculas conjugadas, como las de las purinas y pirimidinas del ADN, que Watson o que Crick.

Y añadía, en una manifestación que algunos considerarán exagerada:

Este fue el comienzo de la era del ADN en la biología; la biología se había convertido finalmente en una rama de la química.

La importancia de estos descubrimientos hizo que no se tardara demasiado en considerar la posibilidad de que merecería algún premio Nobel. William Lawrence Bragg, el gran experto en la utilización de la difracción de rayos X para determinar estructuras cristalinas, se dirigió a Pauling preguntándole su opinión. Se han conservado dos cartas de este que abordaban la cuestión. La primera está fechada el 15 de diciembre de 1959, y en ella se lee:

Querido Bragg:

He estado considerando con mucho gusto el asunto planteado en su carta del 9 de diciembre.

Con respecto a Perutz y Kendrew, debo decir que la nominación para un premio Nobel me parece prematura. El trabajo está adquiriendo más y más relevancia, pero los artículos más significativos aún no se han publicado. Incluso después de su publicación tendrá que pasar algún tiempo antes de que se pueda conseguir evaluarlos. Espero con interés la publicación de los artículos que menciona en el resumen de sus trabajos.

El trabajo de Watson y Crick pertenece a una categoría diferente, y estaría dispuesto a escribir una carta de recomendación para su nominación a un premio Nobel. Sin embargo, me parece que su trabajo constituye una contribución al campo de la biología, más que a la química, y creo que sería apropiado que se les concediese un premio Nobel de fisiología y medicina, en lugar de un premio Nobel de química.

Con respecto a la difracción de rayos X y la química, tengo una propuesta que hacerle, y me gustaría conocer su opinión sobre ella. Me gustaría proponer a Dorothy Hodgkin y J. M. Bijvoet para un premio Nobel de Química, que se divida entre ellos. El premio sería por la utilización que han hecho de la difracción de rayos X en la solución de problemas químicos, la determinación de la estructura de la penicilina y la cobalamina, en el caso de Dorothy Hodgkin, y la determinación correcta de las configuraciones de moléculas asimétricas, en el caso de Bijvoet. ¿Apoyaría usted esta propuesta?

La segunda carta la dirigió Pauling al Comité Nobel para química (con copia a Bragg), el 15 de marzo de 1960:

Señores:

El Profesor Sir William Bragg me ha enviado una copia de su nominación de J. D. Watson, F. H. C. Crick y M. H. F. Wilkins para el premio Nobel de química correspondiente a 1960, por sus trabajos sobre la estructura del ácido desoxirribonucleico, y ha sugerido que exprese mi opinión.

La doble hélice con un enlace de hidrógeno para el ADN propuesta por Watson y Crick ha ejercido una muy gran influencia en el pensamiento de los genéticos y otros biólogos, y creo que su idea es valiosa. Mi opinión es que existen pocas dudas de que las moléculas de ácido nucleico tienen una estructura complementaria parecida en su naturaleza general a la propuesta por Watson y Crick, y que la complementariedad está determinada por la formación de enlaces de hidrógeno. Sin embargo, pienso que la naturaleza detallada de la estructura del ADN es todavía incierta en alguna medida, mientras que las cadenas polipeptídicas de las proteínas son ahora ciertas.

La primera estructura detallada propuesta para los ácidos nucleicos era una estructura en triple hélice, con enlaces de hidrógeno entre los grupos fosfatados, en lugar de entre las bases nitrogenadas. Esta estructura fue propuesta por el profesor Robert B. Corey y por mí en Proceedings of the U.S. National Academy of Sciences *39, 84-87 (1953). Watson y Crick dispusieron de este manuscrito antes de su publicación y puede que haya estimulado hasta cierto punto la formulación de su estructura en doble hélice, al igual que por las fotografías de rayos X de Wilkins.*

La estructura detallada propuesta por Watson y Crick ha sido revisada por Wilkins. Además, Corey y yo hemos señalado que es probable que la citosina y la guanina formen enlaces con tres hidrógenos, en lugar de dos como proponen Watson y Crick.

Y, tras unas líneas en las que añadía algunos comentarios y precisiones sobre la aportación de Watson y Crick, añadía:

Es mi opinión que el conocimiento actual de la estructura de las cadenas polipeptídicas en proteínas es tal que justifica la concesión del premio Nobel en este campo, en el futuro cercano, a Robert B. Corey por sus investigaciones fundamentales sobre la estructura molecular detallada de aminoácidos y cadenas polipeptídicas de proteínas, o posiblemente dividido entre él y Kendrew y Perutz. Por otra parte, creo que puede ser prematuro otorgar un premio Nobel a Watson y Crick debido a las incertidumbres existentes sobre la estructura del ácido nucleico. Yo mismo creo que la naturaleza general de la estructura de Watson y Crick es correcta pero que existen dudas acerca de ciertos detalles.

Con respecto a Wilkins, puedo decir que reconozco su virtuosismo habiendo crecido mejores fibras de ADN que las que se habían crecido antes y sacado mejores fotografías de rayos X que las disponibles antes, pero dudo que su trabajo represente una contribución suficiente a la química como para permitirle ser incluido entre los receptores de un premio Nobel.

En un último párrafo, Pauling añadía que lamentaba que W. M. Latimer y W. H. Rodebush hubiesen muerto y que sus contribuciones de gran importancia al estudio del enlace de hidrógeno en las moléculas de organismos vivos así como en sustancias sencillas les harían, en su opinión, merecedores de un premio Nobel de química.

La carta de Pauling al Comité Nobel de química muestra varias cosas. Sobre todo, que ya no parecía estar tan seguro como en la carta anterior de que Watson y Crick merecieran el premio Nobel, y sí Robert Corey (que trabajaba en su laboratorio y había colaborado con él) —de alguna forma, aunque no se atreviera a decirlo, debía de pensar que él, Pauling, también merecía el Nobel—, quien acaso debiera recibirlo compartido (la mitad para él) con Kendrew y Perutz. Otro detalle significativo es que ignoraba que las fotografías de rayos X, que tan importantes habían sido para descubrir la estructura del ADN, no las había tomado Wilkins —a quien no consideraba merecedor del premio Nobel— sino Rosalind Franklin (que había fallecido en abril de 1958).

En 1962, la Fundación Nobel concedió a Watson, Crick y Wilkins el premio Nobel de medicina, mientras que Max Perutz y John Kendrew compartieron el Nobel de química por, respectivamente, sus «investigaciones sobre la estructura de proteínas globulares (en particular la hemoglobina)» y por «la determinación de la estructura de la mioglobina» [*véase* «La estructura de la hemoglobina y el transporte respiratorio», por M. F. Perutz; Investigación y Ciencia, febrero de 1979]. Ni Robert Corey ni Johannes M. Bijvoet recibieron el Nobel. Sí Dorothy Crowfoot Hodgkin, que obtuvo el de química en 1964 «por sus determinaciones mediante técnicas de rayos X de la estructura de importantes sustancias bioquímicas».

Pacifista

Ningún escrito dedicado a Linus Pauling podría estar medianamente completo si no se hiciera referencia en él a la gran actividad social que desarrolló en pro del pacifismo, tareas que le granjearon un segundo premio Nobel, el de la paz. Existen numerosos documentos relativos a sus actividades en este dominio, de los que, como muestra, ofreceremos únicamente una carta que envió al presidente John F. Kennedy el 26 de enero de 1962:

Querido Sr. Presidente:

Le urjo a que no ordene la reanudación de las pruebas atmosféricas de armamento nuclear por parte de Estados Unidos.

Hasta el momento Estados Unidos ha realizado alrededor del doble de pruebas de explosiones de armas nucleares que la Unión Soviética. El megatonaje de las bombas probadas por la Unión Soviética es aproximadamente un 60 por ciento superior al de las bombas probadas por Estados Unidos, pero es el número de pruebas, más que el megatonaje total, lo que determina la cantidad de información que se obtiene. No hay duda de que Estados Unidos todavía va muy por delante de la Unión Soviética en tecnología de armamento nuclear.

No es necesario para la protección de Estados Unidos y del pueblo americano que nuestro Gobierno reanude las pruebas nucleares en la atmósfera.

Existe un acuerdo general entre los biólogos sobre los efectos biológicos de la radiactividad. Nadie puede negar que los productos de fisión ocasionados por estas pruebas en la atmósfera dan lugar a mutaciones genéticas que conducirán al nacimiento de niños con graves defectos. El número de niños con estos defectos originados por los productos de fisión y por la radiación de alta energía no puede en general ser estimado con precisión. Las estimaciones más fiables realizadas por los genéticos americanos, que también están de acuerdo con las estimaciones del Comité de las Naciones Unidas para este asunto, hablan de unos 1000 niños con defectos graves por megatón de fisión.

Además, el carbono 14 producido por los neutrones emitidos en la explosión, incluso en las explosiones de las denominadas «bombas limpias», causará, según las estimaciones mejor valoradas, un número considerablemente mayor de niños con defectos graves que los productos de fisión, siempre que la raza humana continúe existiendo en la Tierra durante la vida de los núcleos de carbono 14.

Por otra parte, muchos científicos, aunque no todos, piensan que es altamente probable que los productos de la fisión radiactiva y el carbono 14 dañen a los humanos que ahora viven, al igual que a los de generaciones futuras, en formas tales que ocasionen leucemia, cáncer de huesos y otras enfermedades.

No dudo que podríamos destruir a la Unión Soviética con las bombas que tenemos ahora, incluso después de un ataque inicial, y creo que nuestro peligro no aumentaría en absoluto si nos refrenásemos de probar bombas en el futuro imaginable. Entre tanto, nuestros esfuerzos por lograr una paz y desarme se harían más eficaces por nuestra posición moral y por la mejora de nuestra postura con las naciones neutrales si nos contuviéramos de llevar a cabo más pruebas con armas nucleares.

Le urjo a que no se ordenen más pruebas de armamento nuclear, y que en su lugar se haga un esfuerzo mayor para lograr un acuerdo de pruebas nucleares, con controles e inspecciones internacionales, y otros acuerdos encaminados al fin de un desarme completo con control e inspección.

Linus Pauling fue un científico extraordinario, y merece por ello ser recordado, pero aún más lo merece por su compromiso con la paz mundial. ■

PARA SABER MÁS

Early days of molecular biology in the California Institute of Technology. Linus Pauling en *Annual Review of Biophysics and Biophysical Chemistry*, vol. 15, págs. 1-10, junio de 1986.

Force of nature. The life of Linus Pauling. Thomas Hager. Simon & Schuster, 1995.

Linus Pauling, scientist and peacemaker. Dirigido por Clifford Mead y Thomas Hage. Oregon State University Press, 2001.

Archivo sobre Pauling en la Universidad Estatal de Oregon: **scarc.library.oregonstate.edu/coll/pauling**

EN NUESTRO ARCHIVO

Linus C. Pauling: por delante de su tiempo. John Horgan en *IyC*, abril de 1993.

por Bartolo Luque



Bartolo Luque es físico y profesor de matemáticas en la Universidad Politécnica de Madrid. Sus investigaciones se centran en la teoría de sistemas complejos.

Un siglo de matemáticas recreativas

De Lewis Carroll a Martin Gardner: un recorrido por la historia reciente de un género tan antiguo como la propia matemática

En el papiro Rhind, uno de los primeros documentos escritos de la historia de las matemáticas (fue redactado en Egipto hace nada menos que 35 siglos), ya aparece un problema de matemáticas recreativas. Así que la matemática lúdica es tan antigua como la misma matemática, por lo que abarcar su historia constituiría una empresa enciclopédica. Con todo, en la columna de este mes me gustaría proponerles algunos de los juegos y acertijos matemáticos más famosos e influyentes concebidos entre finales del siglo XIX y finales del XX.

La selección no es más que una pincelada, pero creo que refleja bien la variedad de temas, estrategias didácticas y sentido del humor que caracterizan a este género. Si intentan resolver todos los problemas que siguen, tendrán garantizadas unas cuantas horas de entretenimiento. Al final de la columna podrán encontrar las soluciones, referencias y comentarios a los problemas propuestos. Espero que los disfruten.

Lewis Carroll

DOMINIO PÚBLICO

Lewis Carroll (1832-1898)

Archiconocido por su *Alicia en el País de las Maravillas*, Lewis Carroll combinó su pasión por la lógica con un estilo surrealista *avant la lettre* para convertirse en un irrepetible creador de juegos matemáticos. En su *Pillow problems*, de 1893, nos encontramos una deliciosa falacia que emplea el teorema de la probabilidad total de forma, como diría un *lord* inglés, «pintoresca»:

Un saco contiene dos fichas, de las que nada se sabe excepto que cada una de ellas es, o bien blanca, o bien negra. Determine el color de las fichas sin sacarlas de la bolsa.

El reverendo Charles Lutwidge Dodgson realiza la sorprendente afirmación de que, necesariamente, una de las fichas

ha de ser blanca y la otra negra. Para justificarlo, propone introducir una ficha negra en la bolsa y hacer un pequeño cálculo.

Si llamamos *Sn* al evento «sacar una ficha negra de la bolsa que ahora contiene tres fichas», por el teorema de la probabilidad total tenemos que

$$\begin{aligned} P(Sn) &= P(Sn|bb)P(bb) + \\ &\quad P(Sn|bn \text{ o } nb)P(bn \text{ o } nb) + \\ &\quad P(Sn|nn)P(nn) \\ &= 1/3 \times 1/4 + 2/3 \times 1/2 + 1 \times 1/4 = 2/3 \end{aligned}$$

Pero ese valor, 2/3, es justamente la probabilidad de extraer una ficha negra de un saco que contiene una ficha blanca y una negra al que hemos añadido una ficha negra más. Así que podemos concluir que, antes de añadir la ficha negra, la bolsa ya contenía una ficha negra y una blanca.

Lewis Carroll remata la delirante solución con una frase magistral:

A usted, mi querido lector, esto puede parecerle anormal e incluso paradójico. Pero me gustaría que se preguntara a sí mismo con franqueza: ¿no es la vida misma una paradoja?

¿Puede explicar por dónde está la trampa?

Henry Ernest Dudeney (1857–1930)

Uno de los más grandes creadores de acertijos matemáticos fue el autodidacta inglés Henry Ernest Dudeney. La mejor prueba de ello es que, casi un siglo después de su muerte, sus obras se siguen reimprimiendo. En español es fácil encontrar todavía una media docena en circulación. En *Los acertijos de Canterbury* (1907) hallamos una de sus creaciones más célebres, un problema de disección geométrica que Dudeney bautizó como «el acertijo del mercero»:

Se hicieron muchos intentos, por mucho tiempo infructuosos, para convencer al mercero [...] de que propusiera un acertijo. Al fin, en una de las paradas de los peregrinos, dijo que les enseñaría algo que les retorcería el cerebro «como se retuerce la cuerda de una campana». De hecho, estaba gastándoles una broma, pues él ignoraba si existía una respuesta al problema que les presentaba.

Enseñó un trozo de tela con forma de triángulo equilátero [...] y dijo: «¿Es alguno de vosotros diestro en el corte de género? Estimo que no. [...] Mostradme,

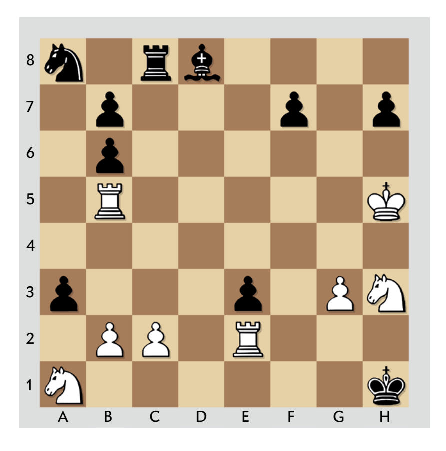
1	2	3	4
5	6	7	8
9	10	11	12
13	15	14	

1. EL PUZLE DEL 15, de Sam Loyd, causó furor en el siglo XIX. Aprovechando la casilla libre, ¿puede reordenar las fichas hasta que los quince números queden ordenados?

pues, si podéis, de qué manera habría que cortar este trozo de género en cuatro piezas para que estas puedan reunirse y formar un cuadrado perfecto.

Algunos de los más avezados de la compañía encontraron el modo de resolverlo con cinco piezas, pero no así con cuatro. Mas cuando presionaron al mercero para que les diera la solución correcta, este tuvo que admitir, luego de varias evasivas, que no conocía la manera de hacerlo en ningún número de piezas. «Por San Francisco», dijo, «cualquier bribón puede, creo yo, proponer un acertijo, pero es para los conocedores el resolverlo». Gracias a esto se salvó por poco de una golpiza. Pero el punto curioso es que yo he encontrado que, de hecho, puede resolverse con solo cuatro piezas y sin revertir ninguna al unirlas. El método es sutil, pero pienso que el lector encontrará en ello un problema muy interesante.

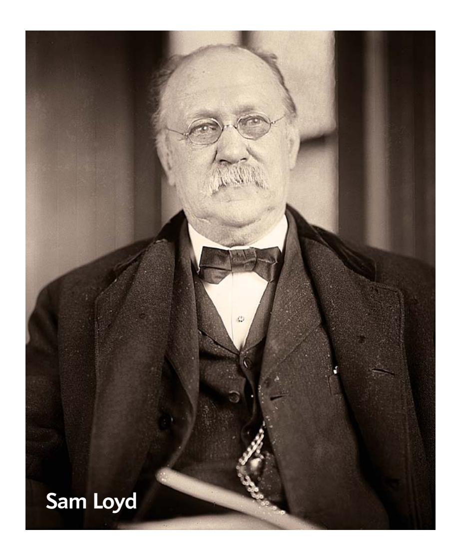
Y, en efecto, este acertijo geométrico tiene solución. ¿Sabe cuál?



2. EXCELSIOR, uno de los problemas de ajedrez más famosos de todos los tiempos, fue también propuesto por Loyd. Las blancas juegan y dan mate en cinco movimientos «con la pieza o peón menos probable».

Sam Loyd (1841-1911)

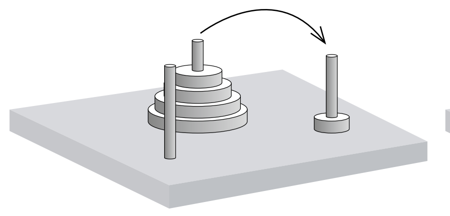
Hacia 1893, Dudeney comenzó una relación epistolar al otro lado del Atlántico con otro de los grandes creadores de rompecabezas de todos los tiempos: el estadounidense Sam Loyd. Un intercambio que acabó mal cuando Dudeney se enteró de que Loyd publicaba su material inédito sin ni siquiera mencionarlo. Además, hace poco se ha demostrado que uno de los juegos más famosos de Loyd, el «puzle del 15», tampoco era en

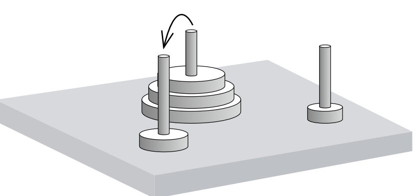


realidad creación suya, sino una apropiación ligeramente alterada de un juego preexistente. Sea como fuere, aquel rompecabezas causó en su momento furor entre el público, por lo que merece la pena mencionarlo aquí.

El juego consta de un tablero de 4 × 4 casillas sobre el que se disponen 15 cuadrados numerados. Los 13 primeros aparecen en orden, pero los que muestran los números 14 y 15 se sitúan invertidos, tal y como se muestra en la figura 1. Aprovechando el hueco libre, el objetivo consiste en desplazar las fichas cuadradas como desee hasta ordenar los 15 números.

Loyd llegó a ofrecer mil dólares a quien lo resolviera. Premio que, sin embargo, nunca nadie llegó a cobrar, pues se trata de un problema imposible de resolver. El verdadero acertijo consiste, pues, en demostrar por qué no tiene solución.





3. LA TORRE DE HANÓI, concebida por Édouard Lucas, se ha convertido con el tiempo en un problema clásico sobre recursividad. Esta representación simplificada (con un número reducido de discos) muestra los dos primeros movimientos.

Apropiaciones indebidas aparte, Loyd probablemente haya sido la persona que más acertijos y rompecabezas haya creado en la historia de la matemática recreativa. Fue además jugador de ajedrez profesional y, como tal, muchos de sus problemas más famosos son de ajedrez. En una selección de matemática recreativa como esta no puede faltar uno de ellos, así que recordaremos uno de los más célebres.

El problema en cuestión se reproduce en la figura 2. Conocido con el nombre de Excelsior, fue creado en 1861 y presentado con las siguientes palabras: «Juegan las blancas y dan mate en cinco movimientos con la pieza o peón menos probable».

Édouard Lucas (1842-1891)
François Édouard Anatole Lucas sigue presente entre nosotros por sus trabajos sobre la generalización de la secuencia de Fibonacci y por el test de primalidad que lleva su nombre. Pero goza también de un lugar propio en la matemática recreativa por la invención de algunos juegos que, con el paso del tiempo, han acabado convertidos en iconos.

Las torres de Hanói, probablemente su creación más popular, es un problema clásico que aparece en cualquier libro de ciencias de la computación donde se pretenda ilustrar la recursividad. Otro de los grandes de la matemática recreativa, W. W. Rouse Ball (1850-1925), lo presentó con el siguiente relato apocalíptico en su libro *Mathematical recreations and essays* (1892):

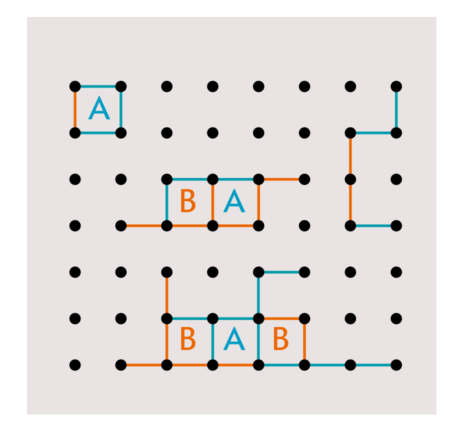
En el gran templo de Benarés, bajo el domo que señala el centro del mundo, hay una placa de latón a la que están fijadas tres agujas de diamante, de un codo de alto cada una y tan gruesas como el cuerpo de una abeja. En torno a una de ellas, Dios, en el acto de la creación, colocó 64 discos de oro puro, descansando el mayor sobre la placa de latón y decreciendo progresivamente en tamaño los demás conforme se asciende por la pila. Es la torre de Brahma.

Día y noche, sin cesar, los sacerdotes del templo van transfiriendo los discos de una aguja de diamante a otra de acuerdo con las leyes fijas e inmutables de Brahama, las cuales exigen que el oficiante no mueva más de un disco por vez, y que sitúe tal disco en otra aguja sin que nunca queden por debajo discos más pequeños. Cuando los 64 discos se hayan transferido de la aguja en que Dios los colocó durante la creación a una de las otras, la torre, el templo y los brahmines quedarán reducidos a polvo y, con inmenso estruendo, el mundo se desvanecerá.

Una representación simplificada del problema (con menos discos) se encuentra en la figura 3.

Seguro que recuerda de su infancia el juego de los cuadritos. Se jugaba (¡y en plena época de Internet, aún se juega!) con lápiz sobre papel cuadriculado, y lo creó Lucas en 1889 con el nombre de *pipopipette*. Si participan dos contrincantes, cada uno va uniendo alternativamente dos vértices de una cuadrícula con líneas horizontales o verticales, pero no diagonales. Cuando un jugador cierra con su línea un cuadrado, escribe su inicial para distinguirlo de los conseguidos por su oponente, tal y como puede verse en el ejemplo de la figura 4. Después de que un jugador complete un cuadrado, puede dibujar otra línea más. Gana la partida quien, para un tamaño dado de la cuadrícula inicial, logre completar el mayor número de cuadrados.

Este juego ha sido analizado numerosas veces. Es posible encontrar estrategias ganadoras para tableros pequeños, en particular de 5×5 puntos.



4. *PIPOPIPETTE*, un juego tan sencillo como rico en estrategias, propuesto en 1889 por Édouard Lucas.

Yákov Perelmán (1882-1942)
Este «cantante de las matemáticas, cantautor de la física, poeta de la astronomía y heraldo del espacio», en palabras del ingeniero aeroespacial ruso Valentín Glushkó, falleció en la Segunda Guerra Mundial durante el sitio de Leningrado. Casi un siglo después, aún podemos leer con el mismo interés una docena de sus más de cuarenta libros de matemáticas y



DOMINIO PÚBLICO (*Perelmán*)

ciencia recreativas, que se siguen reeditando en varios idiomas.

¿El secreto de su éxito? En sus propias palabras: «A fin de hacer más atrayente el tema y elevar el interés por él, me valgo de métodos diversos: problemas basados en cuestiones originales que despiertan la curiosidad, entretenidas excursiones por la historia de las matemáticas, inesperadas aplicaciones del álgebra a cuestiones de la vida práctica, etcétera». Veamos un par de perlas. La primera está tomada de su obra *Matemáticas recreativas* y se puede ver una representación en la figura 5:

Un piñón de 8 dientes está engranado con una rueda de 24 dientes. A medida que la rueda gira, el piñón se mueve por la periferia. ¿Cuántas veces girará el piñón alrededor de su eje mientras da una vuelta completa alrededor de la rueda dentada?

El segundo problema es el que corona su *Álgebra recreativa*:

Terminemos el libro con un ingenioso rompecabezas algebraico que distrajo a los delegados de un congreso físico celebrado en Odesa. Proponemos el siguiente problema: expresar cualquier número entero y positivo usando únicamente tres doses y las operaciones matemáticas que se deseen.

Martin Gardner (1914-2010) y su legado

Concluyamos con un divulgador que marcó un antes y un después en la matemática recreativa desde su columna «Juegos matemáticos», publicada en *Scientific American* durante casi tres décadas desde diciembre de 1956, y en *Investigación y Ciencia* desde su fundación, en octubre de 1976.

No me equivocaré si afirmo que Gardner ha sido el causante de más vocaciones matemáticas de todos los tiempos. En sus columnas recuperó la escasa literatura de matemática recreativa que agonizaba en los años cincuenta y puso en la palestra los trabajos de matemáticos como Donald Coxeter, Solomon Golomb o John Horton Conway. Es imposible resumir las contribuciones de Gardner a la matemática recreativa, de modo que les recomiendo el número monográfico publicado hace poco con motivo de su centenario y citado en la bibliografía.

El testigo de Gardner fue tomado por una lista de grandes divulgadores que mantuvieron la columna como un referente mundial de la matemática recreativa. Douglas Hofstadter, quien publicó entre 1981 y 1983, fue el primero. Tras 25 maravillosos artículos tomó las riendas Alexander Keewatin Dewdney, con un total de 78 textos entre 1984 a 1991. Y después, hasta 2001, la sección estuvo bajo la pluma de quien puede considerarse uno de los divulgadores matemáticos más brillantes y prolijos de la actualidad: Ian Stewart. Concluyamos, por tanto, proponiendo un último problema entresacado de su obra *Ingeniosos encuentros entre juego y matemática*:

—Una falacia es un argumento aparentemente convincente que es lógicamente falso —dijo Trinobobo. [...]

—Una aicalaf —dijo Trinotonto— es un argumento aparentemente falso que en realidad es lógicamente correcto.

—Tengo otro problema matemático —dijo Trinobobo—. [...] Es una cuestión de cálculo. ¿Sabes que cuando integras la función exponencial e^x *vuelves a obtener* e^x*?*

—¿Quieres decir que $\int e^x = e^x$*?*

—¡Correcto! Ahora escribe eso como

$$(1-\int)e^x = 0,$$

de modo que

$$e^x = [1/(1-\int)]0 = (1 + \int + \int^2 + \int^3 + \cdots)0,$$

usando la serie de potencias para $1/(1-\int)$. *En otras palabras:*

$$e^x = (1+\int+\int\int+\int\int\int+\cdots)0.$$

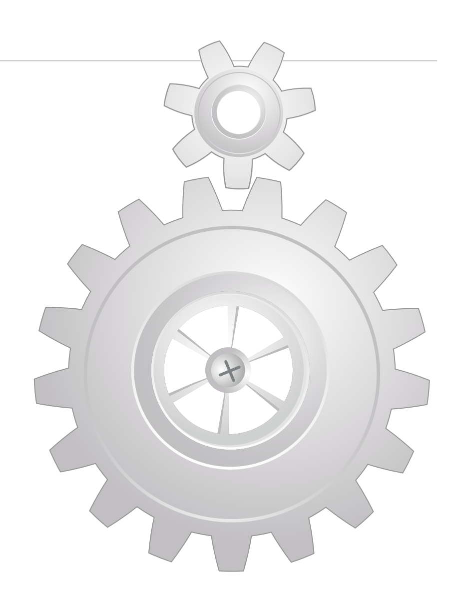
Pero $\int 0 = 1$, $\int 1 = x$, $\int x = x^2/2$, *y así sucesivamente. Así que terminas con la serie de potencias*

$$e^x = 0 + 1 + x^2/2 + x^3/6 + \cdots$$

¿No es sensacional?

¿Nos hallamos ante una falacia o antre una aicalaf?

Déjenme terminar con una mención a la literatura. En *Alicia anotada* (1960), Martin Gardner desveló la miríada de juegos lógicos y matemáticos presentes en la *Alicia* de Carroll, la combinación de literatura y matemáticas recreativas más célebre de todos los tiempos. Sin embargo, no es ni mucho menos la única. La sátira *Planilandia*, escrita en 1884 por Edwin Abbott, es otro clásico del género y sigue vigente a través de las secuelas que han llegado hasta nuestros días: *Sphereland*, del físico Dionys Burger (1965); *The Planiverse*, de Dewdney (1984), o *Flatterland*, de Stewart (2001).



5. PROBLEMA DE LAS RUEDAS DENTADAS, propuesto por Yákov Perelmán en su libro *Matemáticas recreativas*.

Es imposible dar cabida a la multitud de buenos divulgadores y creadores de matemática recreativa de los que disfrutamos hoy. Pero no me gustaría acabar sin hacer mención al más importante de todos: en palabras de la canción *Qualsevol nit pot sortir el sol*, de Jaume Sisa,

Ara ja no hi falta ningú,
o potser sí, ja me n'adono que tan sols
hi faltes tu...

(«Ahora ya no falta nadie / o puede que sí, ya me doy cuenta de que tan solo / faltas tú»)

la mente que goza mientras juega.

PARA SABER MÁS

Mathematical recreations and essays. W. W. Rouse Ball. Dover, 1987.
Alicia anotada. Martin Gardner. Akal, 1998.
Ingeniosos encuentros entre juego y matemática. Ian Stewart. Gedisa, 2000.
The mathematical recreations of Lewis Carroll: *Pillow problems* and *A tangled tale* reading. Lewis Carroll. Dover, 2003.
Cyclopedia of 5000 puzzles, tricks and conundrums with answers. Sam Loyd. Ishi Press, 2007.
Matemática recreativa. Yákov Perelmán. RBA, 2007.
Álgebra recreativa. Yákov Perelmán. RBA, 2007.
Los acertijos de Canterbury y otros problemas curiosos. Henry Dudeney. RBA, 2011.

EN NUESTRO ARCHIVO

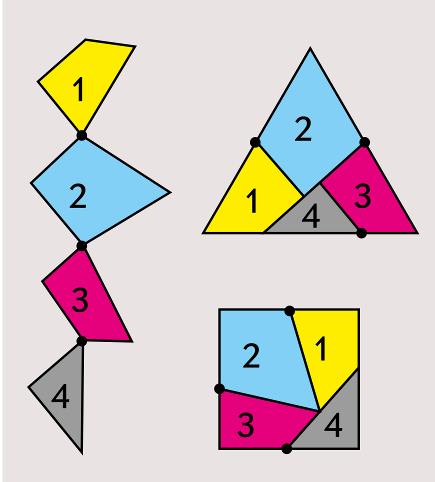
El universo matemágico de Martin Gardner: Juegos, acertijos, paradojas y otras maravillas recreativas. Colección *Temas*, n.º 77, 2014.

SOLUCIONES

▶ **Carroll** aplica el teorema de la probabilidad total de forma torticera. El espacio muestral sobre el que aplica la partición, (*bb*), (*bn* o *nb*) y (*nn*) corresponde a un saco con dos fichas. Pero las probabilidades condicionadas que usa en la ecuación se refieren a un espacio muestral con tres fichas: el saco inicial con una ficha añadida.

▶ **Dudeney** brinda la «solución bisagra» a su problema de disección en el propio libro:

Agrego aquí una ilustración que muestra el acertijo en una forma práctica bastante curiosa, ya que fue realizado en caoba lustrada, con pernos de bronce para uso ante ciertos auditorios. Se verá que las cuatro piezas forman una especie de cadena y que, cuando se cierran en una dirección, forman el triángulo, mientras que cuando se cierran en la otra forman el cuadrado.



▶ El lector puede consultar la demostración de la imposibilidad de resolver el «puzle del 15» de **Loyd** en el artículo de José Heber Nieto «Permutaciones y el Juego del 15», publicado en 2005 en el volumen XIII del *Boletín de la Asociación Matemática Venezolana*. Aunque algo larga, puede seguirla todo aquel que tenga algunos conocimientos de combinatoria.

En cuanto al problema de ajedrez, es el peón en b2 el que finalmente da mate: 1.b4 (amenazando Tf5 y Tf1++, este movimiento del peón evita que las negras claven la torre blanca jugando Tc5) Tc5+; 2.bxc5 (amenaza Tb1++) a2; 3.c6 Ac7 (alarga la amenaza de mate con Td5 y Td1++ o Tf5 y Tf1++ hasta más allá de las cinco jugadas); 4.cxb7 Axg3; 5. bxa8 = D++.

Hoy, los problemas en los que un peón avanza desde su casilla inicial hasta su coronación se conocen como «problemas Excelsior».

▶ Dewdney analizó las torres de Hanói de **Lucas** en esta misma revista en el artículo «Yin y yang: recurrencia o iteración, la Torre de Hanói y las argollas chinas» [Investigación y Ciencia, enero de 1985], donde encontrará las soluciones recursiva e iterativa, así como un bosquejo de la solución usando notación binaria. Al respecto, Dewdney escribe: «Los buenos rompecabezas proporcionan excelentes vías de acceso a los dominios del pensamiento abstracto en que moran matemáticos y otros teóricos. Los mejores incorporan en sí temas pertenecientes a tales dominios; temas cuya importancia desborda considerablemente la de los propios rompecabezas».

También puede leer de la pluma de Stewart, que en su artículo «La ubicua curva de Sierpinski» [Investigación y Ciencia, octubre de 1999] lo califica como «uno de los problemas favoritos de la matemática recreativa», su resolución utilizando grafos y su relación con el triángulo de Sierpinski.

▶ **Perelmán** brinda la siguiente explicación para el acertijo de la rueda dentada y el piñón:

Si piensa usted que el piñón girará tres veces, se equivoca: dará cuatro vueltas y no tres. Para ver claramente cómo se resuelve el problema, ponga en una hoja lisa de papel dos monedas iguales. [...] Sujetando con la mano la moneda de debajo, vaya haciendo rodar por el borde la de arriba.

Observará algo inesperado: cuando la moneda de arriba haya recorrido media circunferencia de la de abajo y quede situada en su parte inferior, habrá dado la vuelta completa alrededor de su eje. Esto puede comprobarse fácilmente por la posición de la cifra de la moneda. Al dar la vuelta completa a la moneda fija, la móvil tiene tiempo de girar, no una vez, sino dos. Al girar un cuerpo trazando una circunferencia, da siempre una revolución más que las que pueden contarse directamente. Por ese motivo, nuestro globo terrestre, al girar alrededor del Sol, da vueltas alrededor de su eje, no 365 veces y 1/4, sino 366 y 1/4, si consideramos las vueltas en relación con las estrellas y no en relación con el Sol. Ahora comprenderá usted por qué los días siderales son más cortos que los solares.

La solución al problema de los tres doses, tal y como aparece en *Álgebra recreativa*, dice:

Mostremos en un ejemplo la solución de este problema. Supongamos que el número dado es el 3. En este caso, el problema se resuelve así:

$$3 = -\log_2 \log_2 \sqrt{\sqrt{\sqrt{2}}}\,.$$

Es fácil convencerse de la veracidad de tal igualdad. [...] Y si el número dado fuera 5, resolveríamos el problema por los mismos procedimientos:

$$5 = -\log_2 \log_2 \sqrt{\sqrt{\sqrt{\sqrt{\sqrt{2}}}}}\,.$$

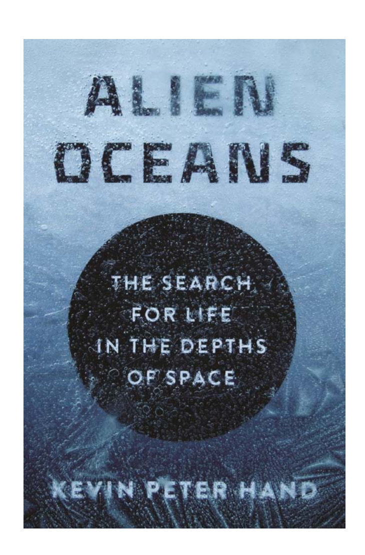
Se tiene presente que, siendo la raíz cuadrada, se omite el índice de la misma. La solución general del problema es como sigue: si el número dado es N, entonces

$$N = -\log_2 \log_2 \sqrt{\sqrt{\sqrt{\cdots\sqrt{2}}}}\,,$$

donde el número de radicales es igual al número dado.

▶ Por último, **Stewart** resuelve la cuestión del último acertijo en su libro. Se trata de una aicalaf:

La teoría de los espacios de Banach se puede usar para dar una justificación rigurosa de las manipulaciones del signo $\int$. *Si se trata como un operador, la expansión de la serie para* $1/(1-\int)$ *es correcta.*



ALIEN OCEANS
THE SEARCH FOR LIFE IN THE DEPTHS OF SPACE
Kevin Peter Hand
Princeton University Press, 2020
304 págs.

En busca de vida extraterrestre

Una mirada entusiasta sobre los océanos de las lunas de los planetas gigantes como lugares idóneos donde encontrar vida

Los océanos terrestres han desempeñado un papel clave en el origen y desarrollo de la vida, por lo que cabría esperar que así fuera en otros planetas similares. Sin embargo, los planetas como la Tierra, situados además en la zona de habitabilidad de su estrella, no parecen abundar: según distintos sondeos, no llega a haber uno por sistema planetario. En contraste, los planetas y lunas con océanos, aunque no se encuentren en las tradicionales zonas de habitabilidad, son mucho más corrientes. Así que, en nuestro empeño por encontrar vida extraterrestre, quizás acabe siendo más fructífero ir a buscarla a ese tipo de mundos helados con grandes océanos.

Si nos ceñimos al sistema solar, se piensa a menudo en Marte como el cuerpo más prometedor para encontrar vida. No obstante, las misiones de exploración y numerosos estudios parecen indicar que hay muchas más posibilidades de hallarla bastante más lejos del Sol; en concreto, en algunas de las lunas de Júpiter y Saturno. Estas cuentan con grandes océanos que pueden haber existido tanto tiempo como la Tierra y que reúnen todas las condiciones necesarias para haber dado lugar a la emergencia de organismos.

Estos son los temas que aborda en *Alien oceans* Kevin Hand, prominente científico de la NASA que ha viajado en misiones de exploración por todo el mundo. Se agradece que, con un tono entusiasta, Hand salpique su narración con anécdotas de sus expediciones a los fondos oceánicos para estudiar formas exóticas de vida que pudiesen tener también lugar en las lunas de los planetas gigantes. Pero el libro está centrado en las posibilidades de encontrar vida en planetas y lunas con océanos y, para ello, el autor examina toda la panoplia de fenómenos relacionados: las condiciones imprescindibles para que surja la vida, la posibilidad de que se den orígenes diferentes en mundos distintos, las características de los ecosistemas en los fondos oceánicos, etcétera.

Alien oceans está escrito en un tono muy agradable y sumamente optimista. Sin embargo, el tipo de lector que acude a estos libros encontrará que, a veces, las explicaciones de algunas cuestiones básicas son demasiado prolijas. Yo esperaría, por ejemplo, que el lector esté al tanto de los fundamentos de la espectroscopía, de los campos magnéticos, o de las mareas. El autor, sin embargo, se refiere a las nociones más básicas de estos fenómenos acudiendo a explicaciones estándar, como la descomposición de la luz en el arcoíris o en los prismas de vidrio.

Creo que otros fenómenos, también descritos con amenidad y rigor, son mucho más relevantes para el tema que aborda la obra. Por ejemplo, la importancia del hielo como magnífico aislante térmico para preservar en los océanos subyacentes las condiciones necesarias para que surja y se proteja la vida; o el sorprendente papel de las mareas para generar calor en esos mismos océanos. Ilustrar estos fenómenos con los ejemplos de los satélites galileanos constituye todo un acierto. Por ejemplo, se nos recuerda que las mareas de Ío, la luna más interna de Júpiter, son capaces de fundir su interior y producir la mayor actividad volcánica del sistema solar, pues el flujo de energía debido a las mareas en Ío es similar al que recibe Venus de la radiación solar. Calisto encuentra similitudes con Marte, mientras que Europa y Ganímedes tienen propiedades intermedias entre las de Venus y Marte; es decir, recuerdan a las de la Tierra.

El lector disfrutará con la descripción de los hallazgos que han llevado a considerar a Europa uno de los cuerpos más prometedores para encontrar vida en el sistema solar: desde el descubrimiento de agua helada, que se realizó desde Crimea con un telescopio de infrarrojos en 1964, hasta las fascinantes imágenes de las placas tectónicas de hielo, conseguidas por las misiones de la NASA Voyager y Galileo, las cuales muestran separaciones entre placas como vetas oscuras que guardan similitudes con las dorsales oceánicas terrestres. El autor se detiene, de manera más que justificada, en todos los indicios que han llevado a concluir la existencia y las propiedades de los océanos bajo esa corteza helada, agua líquida que debe de contener abundantes sales diluidas.

Con explicaciones igual de pacientes y extremadamente claras, nos adentramos en las propiedades de Encélado, el sexto mayor satélite de Saturno. Este reúne propiedades de enorme interés: océanos, plumas y una química que parece apropiada para la actividad bioquímica [*véase* «El océano caliente de Encélado», por Frank Postberg y Thorsten Dambeck; Investigación y Ciencia, diciembre de 2015]. Pero aquí el autor no nos esconde que, aunque esta pequeña luna también sea prometedora para la búsqueda de vida, su investigación está mucho menos avanzada que la de Europa.

Y así llegamos a Titán, el mayor de los satélites de Saturno, un mundo que el autor nos presenta con toda la fascinación que merece. La extraña combinación de hielo de agua y metano líquido, sus sorprendentes ríos, mares y océanos, así como los ciclos estacionales, hacen de Titán uno de los mejores lugares para ir a buscar vida [*véase* «Superficie y atmósfera de Titán», por Ralph Lorenz y Christophe Sotin; Investigación y Ciencia, mayo de 2010]. Nos detenemos en el misterio del origen del metano en esta gran luna, uno de los mayores enigmas de las ciencias planetarias actuales. Dado que, contrariamente a la de agua, la molécula de metano es muy poco polar, nos acabamos preguntando qué tipo de bioquímica haría falta para que la vida surgiese en este exótico mundo, en el que también es muy posible que haya océanos subterráneos. ¿Podrían existir microorganismos

en esos océanos que produjesen el metano que observamos en la superficie? Parece una idea chiflada, pero quizás no carezca completamente de sentido.

Ganímedes, Calisto y Tritón (en Neptuno), e incluso las pequeñas Miranda y Titania (en Urano), son las otras lunas examinadas con cierto detalle, aunque necesariamente menor debido a sus características y a los datos y estudios disponibles. El autor también se detiene en consideraciones sobre lo que sabemos del origen de la vida y algunos de sus atributos: la compartimentación (que lleva a la formación de células) y los procesos de almacenamiento de información y capacidad de réplica. Pero no nos oculta las incertidumbres de la ciencia actual sobre otros aspectos y parámetros; por ejemplo, ¿cuánto tiempo se necesita para que la vida surja y prospere? ¿Son los aminoácidos, los azúcares y los ácidos nucleicos los únicos ladrillos y el único mortero posibles para formar vida?

Las analogías con las condiciones existentes en la Tierra y en nuestros océanos abundan a lo largo del libro. Con todo, echo de menos que el autor no describa los experimentos de laboratorio que se están llevando a cabo actualmente para simular las condiciones de las lunas de los planetas gigantes y estudiar así sus posibilidades para la vida desde un punto de vista experimental.

El libro se cierra con una mirada a las misiones espaciales futuras encaminadas al estudio de las lunas exteriores del sistema solar. Aquí, como en otras obras de científicos estadounidenses, el autor otorga todo el protagonismo a las misiones de la NASA, como la planeada Europa Clipper, pero las de la Agencia Espacial Europea apenas se mencionan. Una misión del calibre del Explorador de las Lunas Heladas de Júpiter (JUICE, por sus siglas en inglés) apenas recibe un pequeño párrafo.

Alien oceans es un libro recomendable, que rebosa entusiasmo y que justifica, con argumentos muy detallados y convincentes, el vehemente esfuerzo realizado en la exploración de las lunas de los planetas gigantes. Todo ello proporciona una primera impresión de la investigación, que ya se está iniciando, sobre planetas y lunas que puedan contener océanos y mares en sistemas planetarios más allá del solar [*véase* «Más acogedores que la Tierra», por René Heller; Investigación y Ciencia, marzo de 2015].

—Rafael Bachiller
Observatorio Astronómico Nacional



HASTA EL FINAL DEL TIEMPO
MENTE, MATERIA Y NUESTRA BÚSQUEDA DE SIGNIFICADO EN UN UNIVERSO EN EVOLUCIÓN
Brian Greene
Crítica, 2020
512 págs.

Memento mori cósmico

Un viaje científico y humanista hacia la eterna pregunta sobre la muerte del universo

La termodinámica, surgida del estudio de las máquinas térmicas de la Revolución Industrial, abrió en la segunda mitad del siglo xix una nueva perspectiva al universo. Su primera ley, que establece la conservación de la energía, condujo a los primeros intentos de explicar la luminosidad de las estrellas como resultado de la transformación en calor de algún tipo de energía mecánica, ya procediera esta del bombardeo de meteoritos o de la contracción del astro bajo su propia gravedad. Las deficiencias de estos mecanismos indicaron pronto que debía existir otra fuente de energía. Esta, sin embargo, permaneció sin precisar hasta el desarrollo de la física nuclear en el siglo xx.

Por su parte, la segunda ley de la termodinámica afirma que el calor fluye de los cuerpos calientes a los fríos hasta igualar sus temperaturas. Rudolf Clausius formalizó este hecho introduciendo una nueva cantidad física, la entropía, cuyo valor en un sistema que no intercambia energía o materia con el entorno nunca decrece. Tal y como Ludwig Boltzmann demostraría poco después, la entropía en realidad mide el desorden del sistema; es decir, nuestra ignorancia sobre los detalles microscópicos que lo caracterizan.

Con esta ley en la mano, la nueva imagen termodinámica del universo apuntaba a que este se habría originado en algún momento del pasado en un estado con entropía relativamente baja. Dicha cantidad habría ido creciendo desde entonces, y lo haría hasta alcanzar, en un futuro lejano, un valor máximo. Ese estado final predicho por la segunda ley encerraba, sin embargo, algunos aspectos inquietantes. Una vez alcanzado, la temperatura del universo sería homogénea y todos los flujos de energía cesarían. El cosmos acabaría sus días como un lugar frío y desolado, en el que todos los procesos térmicos, químicos y biológicos se habrían detenido. Clausius describió dicho estado como «la muerte térmica del universo».

Esta imagen fue complementada por la cosmología del siglo xx, en la que el universo en expansión evoluciona desde una gran explosión a muy alta temperatura hacia un estado de desorden máximo, en el que la materia acabará infinitamente diluida. Pero, si el desorden aumenta constantemente, ¿cómo es posible que a partir de una sopa de partículas elementales se generen estructuras tan ordenadas como las estrellas, las galaxias y, en último término, el cerebro humano?

Esta es una de las preguntas a las que Brian Greene intenta responder en *Hasta el final del tiempo*, una obra que difiere de sus anteriores libros en que va más allá de la mera divulgación científica para convertirse en un ejercicio de divulgación programática. Greene se propone construir una gran narrativa de la historia del universo, desde su origen en la gran explosión hasta los diversos escenarios que podrían describir su final, la mayoría de los cuales empequeñecen hasta lo insólito

a la muerte térmica de la física decimonónica. Lo interesante de este viaje es que no se restringe a una explicación de las leyes físicas que gobiernan el universo, que sería lo habitual en casi cualquier otra obra de divulgación. Antes bien, trata asimismo de entender cómo estas leyes pueden dar lugar a «conglomerados de partículas» que no solo extraigan energía del medio para llevar a cabo un amplio abanico de funciones —la autorreplicación entre ellas—, sino que desarrollen consciencia de sí mismos y se conviertan, en último término, en generadores de cultura.

Volviendo a la pregunta de cómo un universo empeñado en maximizar el desorden puede dar lugar a estructuras ordenadas, Greene nos muestra que este orden emergente no es más que una estrategia del segundo principio de la termodinámica. La gravedad produce el colapso de las nubes de gas para dar lugar a las estrellas, las cuales no son sino estructuras ordenadas que «bombean» más entropía al entorno de la que absorben en su interior al sintetizar elementos químicos mediante fusión nuclear. El resultado es un aumento de la entropía total del universo, en consonancia con lo decretado por el segundo principio, si bien ese aumento tiene lugar a costa de una reducción local de dicha cantidad.

Esa estrategia opera también en los organismos vivos, que mantienen su entropía bajo control al precio de aumentar la de su entorno. Pero, a este nivel, aparece además un segundo mecanismo, uno que gobierna la evolución de las estructuras biológicas: la selección natural de aquellas modificaciones que, generadas por fallos en la autorreplicación, resulten ventajosas en un entorno concreto.

Tanto a pequeña como a gran escala, el éxito de este «baile entrópico en dos tiempos», por usar la expresión de Greene, radica en el carácter efímero de las estructuras ordenadas a las que da lugar. Tarde o temprano, la segunda ley acaba siempre por conquistar los últimos reductos del orden: las estrellas dejan de radiar energía y los seres vivos mueren. Pero, en un universo eterno, esa transitoriedad va más allá de las estructuras ordenadas: afecta a la materia y al mismo vacío.

Según el modelo estándar de la física de partículas, el protón es estable, al menos en la escala de tiempo de la edad del universo (los algo más de 10^{10} años transcurridos desde la gran explosión). Sin embargo, la mayoría de los modelos que extienden el modelo estándar predicen la desintegración del protón en escalas del orden de 10^{38} años. Incluso en el contexto del propio modelo estándar, existen mecanismos que hacen que el protón sea inestable, aunque su vida sería notablemente más larga, de unos 10^{150} años. La conclusión más plausible es, por tanto, que tarde o temprano los protones acabarán por desaparecer, lo que destruirá los átomos que constituyen la materia ordinaria.

Más aún: el propio vacío, cuyas propiedades están determinadas por el valor del campo de Higgs, que da masa a las partículas elementales, también sería inestable. Debido al efecto túnel cuántico, el valor de este campo puede cambiar localmente, lo que provocaría la aparición de «burbujas» en cuyo interior las partículas tendrían masas diferentes a las conocidas. Al crecer, esas burbujas engullirían regiones cada vez mayores del universo. Es incierto cuándo podría ocurrir esto, pero los cálculos permiten aventurar escalas de tiempo entre los 10^{102} y los 10^{359} años.

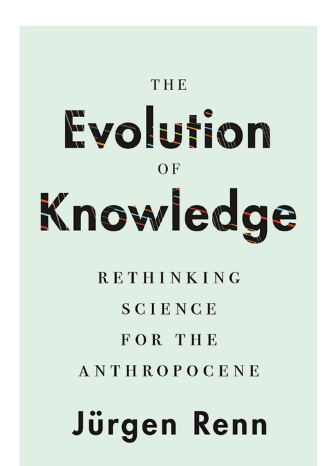
Extinguidas las estrellas y evaporados los últimos agujeros negros, el futuro más plausible del universo es el de un espacio prácticamente vacío en expansión acelerada. Sin embargo, la interpretación de Boltzmann de la entropía implica que el segundo principio de la termodinámica es una ley estadística que permite excepciones. Un sistema puede disminuir su entropía de forma apreciable, solo que la probabilidad de que eso ocurra es tan diminuta que sería necesario esperar eones para verlo. Como consecuencia, nos explica Greene, podría haber regiones del universo que «resucitasen» de la muerte térmica, iniciando un nuevo ciclo de generación de estructuras ordenadas y efímeras. Una situación particularmente exótica sería que la radiación procedente del horizonte de sucesos de un universo en expansión acelerada formara espontáneamente estructuras pensantes, conocidas en la terminología científica como «cerebros de Boltzmann». Los tiempos necesarios para que esto ocurriera están más allá de cualquier intuición humana: 10 elevado a 10^{68} años. Aunque bien es cierto que esto importa poco en un universo que tiene, literalmente, toda la eternidad por delante.

El viaje que nos propone Greene comienza y concluye en la física, pero sus etapas pasan por la biología, la neurociencia, la antropología y la filosofía, entre otras disciplinas. El libro discute el origen de la consciencia y el lenguaje, o de qué manera actividades que consideramos intrínsecamente humanas, como la ciencia, el arte —en todas sus manifestaciones— y la religión, podrían explicarse en función de las ventajas evolutivas que aportan. También si existe algún sentido en que pueda afirmarse que un conjunto de partículas gobernadas por leyes naturales precisas goza de libre albedrío. Todo ello desde un punto de vista que podríamos calificar de «reduccionismo moderado», en el que, admitiendo como premisa ontológica que todo se reduce a partículas gobernadas por leyes físicas, acepta la utilidad de diferentes lenguajes para entender y apreciar la realidad en sus diversos niveles.

La conclusión filosófica a la que nos conduce esta obra de Greene es la de que el ser humano está «arrojado» a un mundo en el que no solo los individuos o las sociedades son efímeros (lo que podríamos llamar la versión «clásica» del problema filosófico de la transitoriedad), sino que el mismo universo que habitamos también lo es. Este hecho nos despoja de cualquier sustituto de la inmortalidad personal que pudiéramos buscar en la progenie biológica o intelectual. Semejante *memento mori* cósmico actualiza profundas cuestiones existenciales, ya que nos enfrenta a un nivel superior, y en su máxima crudeza, con nuestra condición singularmente humana de seres en el tiempo. Otro de los elementos que da a *Hasta el final del tiempo* el carácter de divulgación programática es que, junto a los temas científicos concretos que se desarrollan en sus páginas, hay una cuestión que lo recorre: cómo vivir esta condición existencial o, en palabras del autor, dónde radica «la nobleza de ser».

A pesar de la tan discutida división entre las «dos culturas» que Charles P. Snow popularizó con su famosa conferencia del mismo título en la Universidad de Cambridge en 1959, es relativamente frecuente encontrar en el científico una tentación humanista latente. Brian Greene se ha entregado a ella en *Hasta el final del tiempo*. El resultado es, sin duda alguna, digno de elogio. Se trata de un libro brillante que embarca al lector en un inigualable recorrido de aprendizaje y reflexión, y que se deja apreciar a múltiples niveles gracias a las cuidadosas anotaciones al texto. Una obra, en definitiva, muy recomendable para todo público con inquietudes en ambas culturas.

—Miguel Á. Vázquez-Mozo
Departamento de Física Fundamental
Universidad de Salamanca



THE EVOLUTION OF KNOWLEDGE
RETHINKING SCIENCE FOR THE ANTHROPOCENE
Jürgen Renn
Princeton University Press, 2020
584 págs.

La ciencia ante el reto del Antropoceno

Repensar la manera de producir conocimiento para afrontar la crisis global

Vamos mal. Incluso durante una pandemia nefasta, las noticias sobre la destrucción de la biosfera no se detienen. Los incendios forestales y la fusión acelerada del hielo ártico nos inquietan. La humanidad no es capaz de frenar el cambio climático y sus desastrosas consecuencias, o al menos así lo parece. Las huellas de la actividad humana ya están inscritas de manera irreversible en la superficie del planeta, lo que ha llevado a que la historia humana pase a convertirse en historia de la Tierra. Como consecuencia, hace ya años que geólogos y otros científicos discuten si ya hemos salido del Holoceno y entrado en el Antropoceno [*véase* «¿Existe el Antropoceno?», por Alejandro Cearreta; Investigación y Ciencia, noviembre de 2018].

Pero, aparte de bautizar nuevas épocas geológicas, ¿cuál es el papel de la ciencia y la tecnología en este proceso? ¿Son los científicos y los ingenieros los principales culpables de la destrucción de la naturaleza? ¿O son más bien su Casandra, quienes advierten del peligro fatal sin que nadie les escuche? ¿Van a proporcionar los instrumentos y técnicas necesarias para afrontar la crisis global?

Por supuesto, nadie tiene respuestas sencillas a estas preguntas. Pero confiar en que las soluciones tecnológicas llegarán por sí solas a tiempo sería pecar de ingenuos, advierte Jürgen Renn en *The evolution of knowledge*. Según el historiador de la ciencia alemán, la fe ciega en la ciencia revela una ignorancia profunda sobre la forma en que se genera el conocimiento.

En este sentido, el título y el subtítulo de su último libro son certeros: hemos de estudiar «la evolución del saber» para, de ese modo, «repensar la ciencia de cara al Antropoceno». Para ello Renn defiende la necesidad de entender la generación de conocimiento en toda su complejidad; es decir, en su dimensión social, material, epistemológica e histórica. Como consecuencia, un concepto clave es el de «economía de saber»; esto es, cómo organiza una sociedad la producción, circulación e implantación de conocimiento. Y una mirada hacia atrás puede aclarar cómo han operado y cambiado tales economías del saber a lo largo de la historia.

El análisis de Renn pivota sobre dos aspectos clave que la historia de la ciencia ha puesto de manifiesto en las últimas décadas. En primer lugar, si somos capaces de distinguir por medios analíticos entre conocimiento (*knowledge*), ubicado en el ámbito práctico y en el día a día, y ciencia (*science*), caracterizada por la abstracción, la generalización y la formalización del saber. Dicha tarea se antoja difícil, ya que, como asevera Renn, la evolución del conocimiento científico siempre ha estado estrechamente vinculada a la del conocimiento práctico. Como demuestran de manera contundente un gran número de estudios, los artesanos y otros grupos profesionales (arquitectos, ingenieros, agricultores, criadores) han desempeñado un papel fundamental en la generación de nuevo conocimiento científico.

> La fe ciega en la ciencia revela una ignorancia profunda sobre la forma en que se genera el conocimiento

El segundo aspecto apuntado por Renn es que, tradicionalmente, la historia del saber se ha estudiado desde una perspectiva restringida que privilegia la innovación sobre la implantación, la transmisión y la transformación. Hoy ya no ocurre así: tenemos claro que nunca hay una transmisión «nítida» entre un emisor y un receptor, como sugieren los modelos simplificados de la comunicación. El acto de transmisión de un saber, de una práctica o de un instrumento constituye siempre una adaptación al propio ámbito del receptor, a sus necesidades y maneras de entender el mundo. De este modo, el conocimiento cambia y, en ocasiones, su apropiación local constituye una fuente de innovación.

Aunque Renn basa su análisis en numerosos avances acontecidos en su propia disciplina, esta tampoco queda exenta de críticas. Según él, la historia de la ciencia corre el peligro de acabar enredada en detallados estudios de casos particulares, que, aunque sean excelentes en sí mismos, hacen perder la vista del conjunto. Y en concreto, denuncia la falta de una agenda (política), más urgente que nunca dada la crisis que atraviesa el planeta.

Las ideas de Renn no solo se nutren de la historia de la ciencia, sino de muchas otras disciplinas, desde la filosofía de la ciencia hasta la sociología, la arqueología, la antropología, los estudios religiosos o la historia global. Para reconstruir las economías de saber del pasado hace falta una mirada interdisciplinar. Renn se toma muy en serio el concepto de «historia profunda» (*deep history*). Para lograr una verdadera historia del saber, hay que comenzar por las industrias líticas de nuestros antepasados, el origen del lenguaje, la revolución neolítica y la evolución de la escritura en Mesopotamia. En todos estos casos la transmisión de saber ya es clave y, por eso, resulta obligado centrarse en los aspectos materiales de la comunicación: cómo ha evolucionado la representación del saber desde los gestos hasta el lenguaje hablado y la escritura, y desde los sencillos dibujos de nuestros antepasados hasta los complejos modelos computacionales de hoy.

En este sentido, Renn intenta ser «materialista» e «idealista» a la vez. O mejor dicho, trata de integrar esas dos perspectivas a fin de superar la estéril oposición entre ellas. Destaca el papel clave de las instituciones, tanto las de enseñanza como las de investigación, así como el de las redes locales y transnacionales, e

intenta describir de manera holística la evolución del conocimiento y de las comunidades epistemológicas.

Renn es director del renombrado Instituto Max Planck de Historia de la Ciencia de Berlín desde su fundación, en 1994. Físico de formación, es conocido por sus trabajos sobre Galileo y Einstein, pero hace ya más de una década que investiga la dimensión global del conocimiento. *The evolution of kowledge* sintetiza su colaboración con grupos de perfiles muy distintos y que han estudiado cuestiones tan dispares como la transmisión del saber en el mundo árabe de la Edad Media o los procesos epistemológicos en el campo de la arquitectura. En su *opus magnum*, Renn reconoce de forma recurrente las contribuciones de muchos de sus colegas de profesión. Y esta es de hecho su tesis principal: el conocimiento es un producto social.

A modo de ejemplo, tomemos la construcción de la cúpula de la catedral de Florencia en la primera mitad del siglo xv. Mucho más allá del genio arquitectónico de Brunelleschi, esta fue en realidad un proyecto común conseguido gracias a la colaboración de grupos profesionales de todo signo. Se aprendió construyendo y tomando riesgos de manera consensuada, y fue ello lo que acabó generando nuevo conocimiento: una cúpula sostenida por su propio peso. Al mismo tiempo, Renn intenta asimismo evitar el pecado del eurocentrismo y apunta, por ejemplo, a sorprendentes paralelismos entre la «física» de los antiguos griegos y la de los integrantes del moísmo, una escuela filosófica china del siglo v antes de nuestra era, o a la fascinante interacción entre los misioneros jesuitas y los sabios chinos en torno al año 1600.

La amplia mirada de Renn a lo largo de la historia impresiona. Pero el libro no quiere ser una historia absoluta de la ciencia mundial. Su ambición no es cubrir todas las épocas y ramas de conocimiento, sino que se trata de una obra conceptual, con agenda y dirección marcadas. Algunas partes resultan un poco más difíciles de seguir debido a su carácter abstracto, pero en líneas generales el libro se deja leer con facilidad y placer intelectual, en un viaje que lleva volando al lector desde un ejemplo al siguiente y que recorre la historia del saber desde *Homo habilis* hasta el capitalismo de macrodatos que impera en nuestros días.

The evolution of knowledge admite dos públicos. El primero estaría integrado por sus colegas de profesión, para quienes la historia de la ciencia no puede ser sinónimo de historia del progreso. Renn está de acuerdo, pero argumenta que narrar la evolución del saber no es lo mismo, ya que esta incluye saltos inesperados, fracasos y tiene un carácter multifactorial. En este sentido, el Antropoceno podría servir como concepto vertebrador para desarrollar nuevas narrativas.

El segundo público sería el público general, probablemente mucho más interesado en las soluciones que propone. Al respecto, Renn escribe que «al hacer frente a los desafíos del Antropoceno, el conocimiento puede ser el bien común más importante», pero advierte de que nuestro tiempo está marcado por la fragmentación del conocimiento científico y su privatización (como lo ilustra el ejemplo de las empresas farmacéuticas) y su negación con fines políticos y económicos (entre quienes cabe destacar a los negacionistas del cambio climático).

Por todo lo anterior urge buscar nuevas maneras de producir conocimiento, y *The evolution of knowledge* proporciona un catálogo de criterios en cuanto a qué tipo de saber y de ciencia necesitamos. Debe tratarse de un conocimiento abierto, accesible, anclado en la sociedad y alejado de intereses individuales con una motivación puramente económica. Hemos de ser capaces de integrar conocimientos y experiencias diferentes a escala global. Y también habría que pensar en desarrollar una epistemología marcada por la responsabilidad global pero con sensibilidad para los contextos locales. Ello requerirá nuevas formas de diálogo dentro de la sociedad y de colaboración entre las ciencias naturales, humanas y sociales. Una propuesta más concreta sería una Internet diferente, lo que Renn llama «una web epistémica», en la que los ciudadanos generen y controlen los contenidos.

La obra de Renn no carece de tensiones internas. Por ejemplo, defiende con vehemencia la investigación básica, que, por definición, está abierta y no busca aplicaciones concretas. Pero ¿podemos permitirnos ese «lujo»? Sin duda, un libro con objetivos tan ambiciosos es también fácilmente criticable. Transformar de manera radical nuestra economía global de conocimiento suena como una tarea hercúlea. Pero ¿qué alternativas tenemos?

—Oliver Hochadel
Institución Milá y Fontanals de Investigación en Humanidades (CSIC) de Barcelona

NOVEDADES

Una selección de los editores de *Investigación y Ciencia*



¿ESTAMOS SOLOS?
EN BUSCA DE OTRAS VIDAS EN EL COSMOS
Carlos Briones Llorente
Crítica, 2020
ISBN: 978-84-9199-221-9
560 págs. (24,90 €)



LA CONQUISTA DEL LENGUAJE
UNA MIRADA A LA EVOLUCIÓN DE LA MENTE SIMBÓLICA
Xurxo Mariño
Shackleton Books, 2020
ISBN: 978-84-18139-03-1
176 págs. (16,90 €)



CONSTRUIR EL MUNDO
Enrique Gracián
Arpa, 2020
ISBN: 978-84-17623-50-0
376 págs. (19,90 €)

Recopilación de Daniel C. Schlenoff

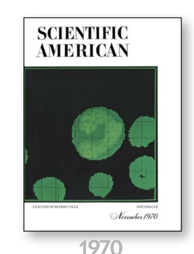
NOVIEMBRE

1970

El futuro nuclear

«La necesidad de generar enormes cantidades adicionales de energía eléctrica a la vez que se protege el entorno se configura como uno de los problemas sociales y tecnológicos más graves que nuestra sociedad deberá resolver en las próximas décadas. Como solución a ese problema, los reactores nucleares del tipo reproductor constituyen una gran esperanza. Al producir más combustible nuclear del que consumen, harían factible utilizar las ingentes cantidades de minerales de uranio y de torio de baja calidad dispersas en las rocas terrestres como fuente de energía barata durante milenios. —Glenn T. Seaborg y Justin L. Bloom»

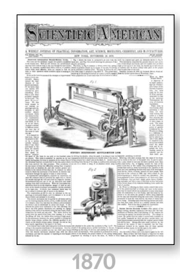
Hoy, de las más de 400 centrales eléctricas nucleares en servicio comercial en el mundo, solo dos emplean reactores reproductores rápidos.



1970



1920



1870

ADN en mitocondrias y cloroplastos

«La genética de las células vivas asombra más de lo expresable en un resumen esquemático. Por ello, suele decirse que el ADN (la molécula de doble hélice) que se halla en el núcleo de cada célula de una planta o un animal contiene el diseño genético completo que permite reconstruir todo el organismo. Pero hace algún tiempo que los genetistas admiten que esa afirmación no puede ser rigurosamente cierta, pues el citoplasma (la zona no nuclear) de toda célula vegetal o animal contiene ciertos orgánulos, o estructuras subcelulares, que poseen su propio ADN. [...] Informes ocasionales hablan de otros orgánulos con ADN, pero las mitocondrias y los cloroplastos probablemente conserven su singularidad por cuanto contienen no solo ácidos nucleicos (ADN y ARN), sino también todo un aparato sintetizador de proteínas. Una hipótesis atractiva es que las mitocondrias y los cloroplastos hoy presentes en las células de plantas y animales fueron en un tiempo organismos de vida libre, lejanos ancestros de las bacterias actuales, que fueron incorporados a células más grandes y se convirtieron en endosimbiontes durante las etapas siguientes de la evolución. —Ursula W. Goodenough y Robert P. Levine»

1920

Información meteorológica

«Durante la pasada estación de los huracanes en las Indias Occidentales, la Agencia Meteorológica de EE.UU. ha ejecutado un programa de observaciones en la atmósfera superior al objeto de determinar la relación, si la hay, entre los "vientos en altitud" (como llama la Agencia ahora a los vientos en la atmósfera superior) y el movimiento de los huracanes. Con globos sonda se han hecho observaciones dos veces al día en las estaciones de la Agencia en Cayo Hueso (Florida) y San Juan (Puerto Rico), y en las de la Armada en Colón y Santo Domingo; se espera que los datos obtenidos en las estaciones aerológicas de la Agencia y el Ejército en Texas contribuyan a la investigación.»

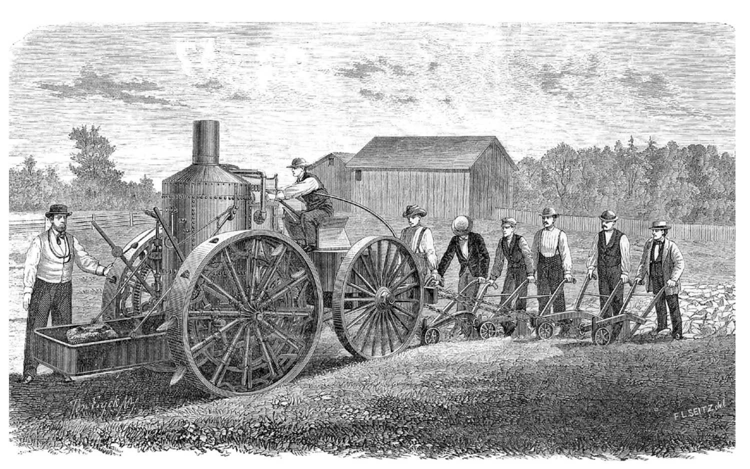
Antes de los antihistamínicos

«El doctor William Scheppegrell publica unas estadísticas que muestran el inicio y el final de la fiebre del heno en primavera y otoño en cada estado de la Unión, las plantas principalmente responsables, y una lista de las "islas sin fiebre del heno" para todos los estados en que se conocen esos lugares. Estos están libres de pólenes productores de fiebre del heno y en ellos pueden hallar alivio los pacientes de esa enfermedad. Como el polen de la mayoría de las plantas alergénicas es muy ligero y puede viajar ocho o diez kilómetros con vientos favorables, pocos lugares del país se libran de esta molesta enfermedad.»

1870

Máquinas de vapor para los agricultores

«La ilustración adjunta del arado de vapor patentado de Redmond es una copia exacta de una fotografía que se tomó de la máquina trabajando en el campo. Hasta ahora, los numerosos intentos de aplicar al arado la locomoción de vapor se saldaron como fracasos por el simple hecho de que el agarre al terreno del tractor era inferior a la resistencia de los arados. En la máquina de la ilustración, ese agarre lo aseguran las uñas de doce anclas repartidas sobre la llanta de cada rueda. El combustible necesario para mantener el vapor en esas calderas tubulares es muy poco, probablemente no más de unos 270 kilogramos al día del mejor carbón.»



1870: Una de las muchas variedades de arado de vapor de la época.

SCIENTIFIC AMERICAN, VOL. XXIII, N.º 19, 5 DE NOVIEMBRE DE 1870

VIROLOGÍA

Lo que hemos aprendido del sida

William A. Haseltine

Lecciones de otra pandemia para combatir la COVID-19.



FÍSICA

Un salto cuántico

Spyridon Michalakis

¿Cómo puede un fenómeno cuántico llegar a ser macroscópico?

ASTRONOMÍA

Materia oscura a la luz de los rayos gamma

Javier Coronado Blázquez y Miguel Á. Sánchez Conde

La luz más energética del universo podría esconder la clave para descifrar uno de los grandes misterios de la cosmología.



ECOLOGÍA

Distanciamiento social en animales

Dana M. Hawley, Julia C. Buck

Langostas, aves y algunos primates utilizan con frecuencia las cuarentenas para evitar el contagio.



INVESTIGACIÓN Y CIENCIA

DIRECTORA EDITORIAL
Laia Torres Casas
EDICIONES
Anna Ferran Cabeza, Ernesto Lozano Tellechea, Yvonne Buchholz
DIRECTOR DE MÁRQUETIN Y VENTAS
Antoni Jiménez Arnay
DESARROLLO DIGITAL
Marta Pulido Salgado
PRODUCCIÓN
M.ª Cruz Iglesias Capón, Albert Marín Garau
SECRETARÍA
Eva Rodríguez Veiga
ADMINISTRACIÓN
Victoria Andrés Laiglesia
SUSCRIPCIONES
Concepción Orenes Delgado, Olga Blanco Romero

EDITA

Prensa Científica, S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona (España)
Teléfono 934 143 344
precisa@investigacionyciencia.es
www.investigacionyciencia.es

SCIENTIFIC AMERICAN

EDITOR IN CHIEF Laura Helmuth
PRESIDENT Dean Sanderson
EXECUTIVE VICE PRESIDENT Michael Florek

DISTRIBUCIÓN

para España:
LOGISTA, S. A.
Pol. Ind. Polvoranca - Trigo, 39 - Edificio B
28914 Leganés (Madrid)
Tel. 916 657 158

para los restantes países:
Prensa Científica, S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona

PUBLICIDAD

Prensa Científica, S. A.
Teléfono 934 143 344
publicidad@investigacionyciencia.es

ATENCIÓN AL CLIENTE

Teléfono 935 952 368
contacto@investigacionyciencia.es

Precios de suscripción:

	España	Extranjero
Un año	75,00 €	110,00 €
Dos años	140,00 €	210,00 €

Ejemplares sueltos: 6,90 euros

El precio de los ejemplares atrasados es el mismo que el de los actuales.

COLABORADORES DE ESTE NÚMERO

Asesoramiento y traducción:

Andrés Martínez: *Apuntes*; **José Óscar Hernández Sendín:** *Apuntes* y *Las tecnologías que han transformado nuestra sociedad*; **Lorenzo Gallego:** *¿Cuándo se pobló América?*, *¿Cómo retractarse en ciencia?* y *El retorno de las epidemias*; **Miguel A. Vázquez Mozo:** *Nuestra visión del cosmos*; **Fabio Teixidó:** *Los peores momentos de la Tierra*; **Carlos Lorenzo:** *El rompecabezas del origen humano*; **Ramón Muñoz Tapia:** *El láser ultravioleta de nitrógeno (II)*; **J. Vilardell:** *Hace...*

ISSN edición impresa 0210-136X Dep. legal: B-38.999-76
ISSN edición electrónica 2385-5665

Imprime Rotimpres - Pla de l'Estany s/n - Pol. Ind. Casa Nova 17181 Aiguaviva (Girona)

Printed in Spain - Impreso en España